

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ARREFECIMENTO DO BETÃO POR EVAPORAÇÃO SUPERFICIAL

SÓNIA CRISTINA DOS REIS SOARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Professor Doutor Carlos Filipe Ferreira de Sousa

Professor Doutor Miguel Ângelo Dias Azenha

JUNHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A todos aqueles que estão sempre presentes.

*“The man who asks a question is a fool for a minute, the
man who does not ask is a fool for a life.”*

Confucius

AGRADECIMENTOS

Antes de mais, quero manifestar o meu mais sincero obrigada a todos aqueles que estiveram sempre presentes ao longo do meu percurso, e que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse o melhor possível e correspondesse aos objetivos que desde cedo delineei.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Ferreira de Sousa, por toda a disponibilidade e paciência. Não podia ter tido uma melhor orientação, com todos os meios que me facultou, todo o conhecimento e positivismo que me transmitiu, que nunca me permitiu perder a confiança das minhas capacidades.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Miguel Ângelo Dias Azenha, pela transmissão de sabedoria, conselhos, apoio e boa disposição.

Aproveito ainda para salientar o importante contributo do Professor Konstantin Kovler pelo contributo na delineação da campanha experimental, anterior ao início desta dissertação.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção da FEUP, por todo o apoio e pelo excelente ambiente que me proporcionaram. Agradeço em particular o apoio na preparação dos moldes e montagem de sensores, betonagens, ensaios de caracterização do betão e disponibilização de equipamentos para medição de variações de temperatura, massa e deformações totais. Quero realçar a colaboração incansável do Manuel, pelo contributo com ideias, pela montagem e manuseamento de materiais e equipamentos e por toda a disponibilidade demonstrada, sempre com simpatia e boa vontade.

Quero ainda agradecer ao Laboratório de Estruturas da FEUP pela disponibilização da câmara climática onde foram realizadas as medições à temperatura de 35°C e também pela disponibilização dos pórticos para as medições de deformações totais no betão. Agradeço à Eng^a Paula Silva o apoio prestado no manuseamento destes equipamentos.

Ao grupo de investigação LABEST agradeço a disponibilização do software DIANA.

Obrigada à Eng^a Cristina Barros da SECIL S.A., pelo fornecimento do cimento, ao Sr. Pedro Sousa da Sika Portugal-Produtos Construção Indústria, S.A., pela disponibilização do adjuvante superplastificante, ao Sr. Arménio Soares da SECIL-Britas S.A., pelo fornecimento das britas e ao Eng^o Guilherme Andrade da SORGILA-Sociedade de Argilas S.A. pela disponibilização de areias.

O presente trabalho inseriu-se no âmbito do projeto IntegraCrete PTDC/ECM-EST/1056/2014 (POCI-01-0145-FEDER-016841), pelo que se agradece às correspondentes entidades financiadoras.

Saliento ainda o apoio fundamental do meu colega e amigo Pedro, que foi uma das pessoas mais presentes ao longo deste ano letivo. Obrigada pelas palavras de incentivo e por toda a boa vontade e ajuda prestada.

Obrigada aos meus amigos, Sandra, Diogo, Mário, Carlo, Catarina, Miguel e Sara Fernandes por todas as palavras, conselhos, amizade e momentos de descontração.

À minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã pela educação, pela paciência e incentivo que sempre me prestaram, essencialmente ao longo dos momentos mais difíceis.

Por último, ao Luís, que foi o meu pilar do início até ao fim. Obrigada pelo apoio sempre prestado, pelas palavras de fé, otimismo e amor. A sua presença foi fundamental nesta etapa.

RESUMO

O estudo do comportamento do betão nas primeiras idades implica a análise dos constituintes e procedimentos que lhe dão origem e do desenvolvimento das suas propriedades ao longo do tempo. Durante o processo de hidratação do cimento e consequente endurecimento do betão, existe uma geração interna de calor e uma evolução significativa das propriedades que regem o comportamento mecânico, térmico e higrométrico do betão. Em simultâneo, o betão é afetado pelo contexto externo que pode ser subitamente alterado por mudança das condições de fronteira. A combinação dos efeitos provocados por condições internas e externas pode conduzir ao desenvolvimento de tensões e deformações indesejadas. Quando o livre desenvolvimento de variações volumétricas é impedido e as tensões no betão excedem a sua capacidade resistente, originam-se fissuras. A dimensão e quantidade de fissuras que se formam no betão, apesar de muitas vezes não colocarem em risco a segurança estrutural a curto prazo, podem afetar o comportamento em serviço e a durabilidade da estrutura devido à facilidade no ingresso de agentes agressivos provenientes do exterior.

Cabe então salientar que a vida em serviço de uma estrutura de betão, ou de outro material cimentício, é claramente influenciada pelas propriedades desenvolvidas nas primeiras idades. É bem sabido que o processo de hidratação do cimento e a geração de calor que lhe está associado influencia de modo determinante o comportamento nas primeiras idades. Outro aspeto com grande relevância, nestas idades, é a variação do teor de humidade no betão que se desenvolve essencialmente após o final da cura (no caso das superfícies não revestidas por cofragem) e após a remoção das cofragens. A variação do teor de humidade no betão tem como consequência principal o desenvolvimento da retração por secagem. Por outro lado, quando as superfícies de betão são expostas, ocorre a evaporação de água a partir da superfície. Esta dissertação incide sobre este último aspeto.

A evaporação superficial provoca uma diminuição de temperatura no betão. O processo de arrefecimento por evaporação relaciona-se com a mudança de fase da água do estado líquido para o gasoso e a esta, está associada energia removida sob a forma de calor, designada por entalpia. Este arrefecimento é sentido ao longo de uma certa profundidade, junto à superfície exposta à evaporação. Se o betão arrefecido estiver restringido (quer por betão a maior profundidade, quer por outros elementos estruturais), desenvolvem-se tensões de tração no betão superficial, que contribuem para agravar o risco de fissuração. Este efeito é tanto mais importante quanto maior for a temperatura ambiente e menor for a humidade relativa, pois nessas condições desenvolve-se uma maior evaporação superficial. No presente documento apresentam-se análises do comportamento do betão após a desmoldagem e a influência da submissão do mesmo a diferentes condições ambientais. Os parâmetros avaliados experimentalmente são as variações de massa, temperatura e deformações longitudinais a partir do momento em que o provete é exposto e se dá início à evaporação superficial e consequente arrefecimento da peça. A dissertação engloba ainda uma fase de modelação numérica para melhor compreensão dos fenómenos que ocorrem no interior e superfície de betão e a comparação com resultados provenientes do programa experimental.

PALAVRAS-CHAVE: primeiras idades, condições de fronteira, evaporação, arrefecimento, retração.

ABSTRACT

The study of the concrete behaviour in its early ages implies the analysis of the components and construction procedures, as well as the development of its properties throughout time. During the process of cement hydration and subsequent concrete hardening, there is an internal heat generation and a significant evolution of the properties that govern the mechanical, thermal and hygrometric behaviour of the concrete. Simultaneously, concrete is affected by the external context which could be suddenly altered by changing boundary conditions. The combination of the effects caused by internal and external conditions may lead to the development of undesirable stresses and strains. When the free development of volumetric variations is restrained and tensions in the concrete exceed its resistant capacity, cracking occurs. The width and quantity of cracks in concrete, even though usually they don't put at risk the short term structural safety, may affect the serviceability and durability of the structure due to the easy entrance of aggressive agents derived from the exterior.

It is important to highlight that the service life of a concrete structure, or other cementitious material, is clearly influenced by properties developed in the early ages. It is well known that the cement hydration process and the associated heat generation influence the behaviour in such ages. Another aspect of great relevance at these ages is the variation of the moisture content in the concrete which develops essentially after the end of curing (in the case of free surfaces, without formwork) and after the removal of the formwork. The variation of the moisture content in the concrete has as main consequence the development of drying shrinkage. On the other hand, when the concrete surfaces are exposed, evaporation of water occurs from the surface. This dissertation focuses on this last aspect.

Superficial evaporation causes a decrease in temperature in the concrete. The evaporative cooling process is related to the phase change of the water from the liquid to the gas state and to this, is associated an energy removed in the form of heat, called enthalpy. This cooling is felt along a certain depth near the surface exposed to evaporation. If the cooled concrete is restrained (either by concrete at a higher depth or by other structural elements), tensile stresses develop in the surface concrete, which contribute to aggravate the risk of cracking. This effect is the more important the higher the ambient temperature and the lower the relative humidity, because under these conditions a higher superficial evaporation is developed. The present document presents analyses of the concrete behaviour after demoulding and the influence of different environmental conditions. Variations of mass, temperature and shrinkage from the moment the sample is exposed, and the superficial evaporation and consequent evaporative cooling begin, are evaluated experimentally. The dissertation also embraces a numeric simulation to better comprehend the phenomena that occur inside and on the surface of concrete and comparison with results from the experimental program.

KEY WORDS: early ages, boundary conditions, evaporation, cooling, shrinkage.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PREÂMBULO	1
1.2. DESCRIÇÃO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2

2. COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ELEMENTOS DE BETÃO	3
2.1 ALTERAÇÕES POR FATORES INTERNOS NAS PRIMEIRAS IDADES DO BETÃO	3
2.1.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	3
2.2 ALTERAÇÕES POR FATORES EXTERNOS NAS PRIMEIRAS IDADES DO BETÃO	4
2.2.1 RETRAÇÃO	4
2.3 MODELO TÉRMICO: ALTERAÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURAS POR FENÓMENOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	6
2.3.1 MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	6
2.3.2 CONDUÇÃO	7
2.3.2.1 LEI DE FOURIER EM REGIME ESTACIONÁRIO	7
2.3.2.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	8
2.3.2.3 LEI DE FOURIER EM REGIME VARIÁVEL	9
2.3.2.4 CALOR ESPECÍFICO	10
2.3.2.5 GERAÇÃO INTERNA DE CALOR	11
2.3.3 CONVECÇÃO	12
2.3.4 RADIAÇÃO	13
2.4. TRANSFERÊNCIA DE CALOR DEVIDO AO ARREFECIMENTO POR EVAPORAÇÃO	14
2.4.1 FLUXO DE CALOR DEVIDO AO ARREFECIMENTO POR EVAPORAÇÃO	14
2.4.2 TRABALHOS PRÉVIOS PARA AVALIAR OS EFEITOS DO ARREFECIMENTO POR EVAPORAÇÃO	16

3. PROGRAMA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	19
3.1 INTRODUÇÃO	19
3.2 PREPARAÇÃO EXPERIMENTAL	22
3.2.1 COMPOSIÇÃO DO BETÃO E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	22

3.2.2 PREPARAÇÃO DA BETONAGEM DOS PROVETES PARA AVALIAÇÃO DO ARREFECIMENTO POR EVAPORAÇÃO.....	25
3.2.3 CUIDADOS NA AMASSADURA E DURANTE A BETONAGEM.....	26
3.2.4 PROCEDIMENTOS IMEDIATAMENTE APÓS A BETONAGEM	27
3.2.5 DESMOLDAGEM E MEDIÇÕES	27
3.3 MEDIÇÕES DE MASSA	28
3.4 MEDIÇÕES DE TEMPERATURA.....	28
3.5 MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÕES LONGITUDINAIS	30

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	33
4.1 AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA	33
4.2 EVAPORAÇÃO A PARTIR DE UMA SUPERFÍCIE	36
4.3 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.....	41
4.4 AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL	45
4.4.1 COMPARAÇÃO DAS EXTENSÕES OBTIDAS COM AS CALCULADAS COM BASE NO DOCUMENTO <i>FIB MODEL CODE FOR CONCRETE STRUCTURES (2010)</i>	52

5. ANÁLISES TÉRMICAS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	55
5.1 INTRODUÇÃO	55
5.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO ELEMENTO EM ANÁLISE	55
5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO BETÃO E ENVOLVÊNCIA	57
5.4 ALTERAÇÃO BRUSCA DE AMBIENTE	59
5.5 PROVETE SUJEITO A EVAPORAÇÃO A PARTIR DA SUPERFÍCIE	63

6. NOTAS FINAIS.....	69
6.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	69
6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	71

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
--	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Extensões devido à retração autogénea e de secagem em betões (Gribniak et al. 2007). a) de resistência normal; b) de elevada resistência.....	6
Figura 2 - Exemplos práticos dos três modos de transferência de calor (Salmoni, 2009).	6
Figura 3 - Representação esquemática da transferência de calor por condução entre dois sistemas a diferentes temperaturas (Boundless, 2014).	7
Figura 4 - Representação esquemática de um sólido sujeito a correntes de convecção (Azenha, 2004).	12
Figura 5 - Interação entre a energia emitida por radiação e o material atingido.....	13
Figura 6 - Desenvolvimento de E_o/E_w de acordo com a proposta de Al-Fadhala e Hover's (2001) para betões e argamassas.....	15
Figura 7 - Resultados experimentais do estudo <i>Shock of Evaporative Cooling of Concrete in Hot Dry Climates</i> (Kovler, 1995). a) Perda de massa; b) deformação total e deformação por efeito de secagem calculada;	16
Figura 8 – Curvas granulométricas dos agregados e respetiva mistura.....	23
Figura 9 - Fases da realização do ensaio de abaixamento. a) Compactação da primeira camada; b) enchimento do molde; c) medição do abaixamento.	23
Figura 10 - Ensaio de massa volúmica. a) Pesagem do provete ao ar livre; b) pesagem do provete submerso.....	24
Figura 11 - Ensaio de resistência à compressão. a) Modo de rotura satisfatório; b) equipamento de ensaio.....	25
Figura 12 - Preparação dos moldes para betonar. a) Fixação à base; b) bases montadas na mesa vibratória.....	26
Figura 13 - Pré cortes efetuados nos tubos de PVC.	26
Figura 14 - Moldes acabados de betonar e isolados com película aderente.....	27
Figura 15 - Pesagens de provetes. a) Provetes de 104mm de diâmetro; b) provetes de 47mm de diâmetro.	28
Figura 16 - Montagem inicial de sensores de temperatura.....	29
Figura 17 - Montagem final de sensores em moldes de 151mm.	30
Figura 18 – Sistema de medição de comprimentos. a) Suporte adaptado; b) Modo de colocação do LVDT utilizado.	31
Figura 19 - Metodologia assumida no cálculo da taxa de evaporação numa superfície de betão.....	37
Figura 20 - Geometria do elemento em análise.	55
Figura 21 – Malha de elementos finitos. a) Provelte de 104 mm de diâmetro; b) provete de 151 mm de diâmetro.	56
Figura 22 - Elemento finito de 8 nós (Diana FEA Manual, 2016).	57
Figura 23 - Evolução do campo de temperaturas no provete de 104 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas definidas no Quadro 9 ($k = 2,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 2000000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 9,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).....	61
Figura 24 - Evolução do campo de temperaturas no provete de 151 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas definidas no Quadro 9 ($k = 2,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 2000000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 9,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).....	62

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplo de condutividades térmicas de alguns materiais (Young, 1992).....	8
Quadro 2 - Condutividade térmica de alguns materiais envolvidos na composição do betão a temperaturas de referência (Breugel, 1980).	9
Quadro 3 - Calor específico de alguns materiais envolvidos na composição do betão a temperaturas de referência (Breugel, 1980).....	11
Quadro 4 - Geometrias dos provetes ensaiados.	20
Quadro 5 – Esquema de ensaios associados a resultados válidos.	21
Quadro 6 - Composição de betão utilizada.	22
Quadro 7 – Resultados dos ensaios de abaixamento e resistência à compressão para cada amassadura efetuada.	25
Quadro 8 - Parâmetros térmicos obtidos após calibração.	58

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -Perda de massa dos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem aos dias 3 e 7.	34
Gráfico 2 -Perda de massa dos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao dia 7.....	34
Gráfico 3 -Perda de massa dos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem aos dias 3 e 7.	35
Gráfico 4 -Perda de massa dos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao dia 7.....	35
Gráfico 5 - Perda de massa de água por evaporação nos dois ambientes simulados experimentalmente.	36
Gráfico 6 -Taxa de evaporação de uma superfície de betão inserida no ambiente 1.	38
Gráfico 7 - Taxa de evaporação de uma superfície de betão inserida no ambiente 2.	38
Gráfico 8 - Médias das taxas de evaporação numa superfície de betão.	39
Gráfico 9 -Desenvolvimento E_v/E_w com base em resultados obtidos experimentalmente.	40
Gráfico 10 -Evolução do fluxo de calor devido ao arrefecimento por evaporação.	40
Gráfico 11 - Temperatura registada após betonagem dos provetes de 104mm e 151mm de diâmetro inseridos no ambiente 1.	41
Gráfico 12 -Temperatura registada após betonagem dos provetes de 104mm e 151mm de diâmetro inseridos no ambiente 2.	41
Gráfico 13 - Variação de temperaturas medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro no ambiente 1. a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.	42
Gráfico 14 -Variação de temperaturas medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro no ambiente 1. a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.	43
Gráfico 15 -Variação de temperaturas medidas nos provetes de 151 mm de diâmetro no ambiente 1. a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.	43
Gráfico 16 -Variação de temperaturas medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro no ambiente 2. a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.	43
Gráfico 17 -Variação de temperaturas medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro no ambiente 2. a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.	44
Gráfico 18 - Variação de temperaturas medidas nos provetes de 151 mm de diâmetro no ambiente 2, para exposição aos 3 dias de idade.	44
Gráfico 19 - Deformações medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao terceiro dia.	47
Gráfico 20 - Deformações medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao sétimo dia.....	47
Gráfico 21 - Deformações medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao terceiro dia.	47
Gráfico 22 - Deformações medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao sétimo dia.....	48
Gráfico 23- Deformações medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao terceiro dia.	48
Gráfico 24- Deformações medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao sétimo dia.....	48
Gráfico 25- Deformações medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao terceiro dia.	49

Gráfico 26- Deformações medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao sétimo dia.....	49
Gráfico 27 - Resultados de todas as deformações totais obtidas.	50
Gráfico 28- Extensões totais registadas no ambiente 1, nas 24 horas após exposição.	50
Gráfico 29- Extensões totais registadas no ambiente 2, nas 24 horas após exposição.	51
Gráfico 30 - Extensões calculadas com base no <i>fib Model Code for Concrete Structures (2010)</i>	52
Gráfico 31 - Calor específico em função do grau de hidratação para os dois ambientes simulados....	57
Gráfico 32 - Resultados experimentais vs simulações numéricas para uma alteração brusca de ambiente no provete de 104 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas anteriores à calibração ($k = 2,54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 1840000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).	59
Gráfico 33 - Resultados experimentais vs simulações numéricas para uma alteração brusca de ambiente no provete de 104 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas definidas no Quadro 9 ($k = 2,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 2000000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 9,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).	59
Gráfico 34 - Resultados experimentais vs simulações numéricas para uma alteração brusca de ambiente no provete de 151 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas anteriores à calibração ($k = 2,54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 1840000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).	60
Gráfico 35 - Resultados experimentais vs simulações numéricas para uma alteração brusca de ambiente no provete de 151 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas definidas no Quadro 9 ($k = 2,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 2000000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 9,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).	60
Gráfico 36 – Valores calculados vs valores medidos para o provete de 104 mm de diâmetro, exposto no ambiente 1 ao terceiro dia de idade.....	64
Gráfico 37 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 104 mm de diâmetro, exposto no ambiente 1 ao sétimo dia de idade.....	64
Gráfico 38 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 151 mm de diâmetro, exposto no ambiente 1 ao terceiro dia de idade.....	65
Gráfico 39 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 151 mm de diâmetro, exposto no ambiente 1 ao sétimo dia de idade.....	65
Gráfico 40 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 104 mm de diâmetro, exposto no ambiente 2 ao terceiro dia de idade.....	66
Gráfico 41 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 104 mm de diâmetro, exposto no ambiente 2 ao sétimo dia de idade.....	66
Gráfico 42 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 151 mm de diâmetro, exposto no ambiente 2 ao terceiro dia de idade.....	67

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

q''_x	Fluxo de calor através de uma superfície por unidade de área
q_x	Fluxo de calor
A	Área atravessada pelo fluxo de calor
k	Condutividade térmica
T	Temperatura
x, y, z	Coordenadas espaciais correspondentes ao sistema de eixos de referência
i, j, k	Versores do sistema de eixos de referência
W	Massa
\dot{Q}	Taxa de geração de energia por unidade de volume
ρc	Calor específico volumétrico
c	Calor específico
$\alpha(t)$	Grau de hidratação no instante t
$f(\alpha_T)$	Função da geração de calor
A_T	Constante proporcional à máxima taxa de geração de calor
E_a	Energia de ativação aparente
R	Constante universal dos gases perfeitos
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção
T_{sup}	Temperatura da superfície
T_{amb}	Temperatura do ambiente envolvente
α_R	Absorvidade
ρ_R	Refletividade
τ_R	Transmissividade
ε_R	Emissividade
σ_R	Constante de Stefan-Boltzmann
q_{evap}	Fluxo de calor devido ao arrefecimento por evaporação
E_c	Taxa de evaporação de água da superfície de betão
h_{lat}	Calor latente de evaporação
T_s	Temperatura da superfície de água
E_w	Taxa de evaporação de uma superfície livre de água
t	Instante de tempo
R_t	Resistência elétrica exibida pelo transdutor

R_0	Resistência nominal a 0°C
A	Coeficiente de temperatura da resistência
ρ	Massa volúmica
ΔM	Variação de massa
Δt	Intervalo de tempo
A_{sup}	Área de superfície exposta a evaporação
ε_t	Deformação longitudinal total do provete
ε_{cs}	Deformação resultante do efeito de retração
$\varepsilon_{\Delta T}$	Deformação de origem térmica
α	Coeficiente de dilatação térmica de betão
ΔT	Diferencial de temperatura

1

INTRODUÇÃO

1.1. PREÂMBULO

Atualmente, o betão é considerado o segundo material mais consumido no mundo, sendo apenas excedido pela água. Dado o seu elevado uso e importância nas mais diversas infraestruturas, requer um estudo muito aprofundado e específico acerca das suas diversas propriedades e previsão comportamental.

O estudo do comportamento do betão nos seus primeiros dias de idade, por exemplo, desde o instante em que é moldado até cerca de 7 dias, trata-se de um assunto bastante atual sendo que a monitorização da evolução das propriedades do betão nas consideradas “primeiras idades” serve de apoio a tomadas de decisões e desenvolvimento de soluções de diversos tipos. Este estudo pode ser útil para definir estratégias e soluções de aplicação de pré-esforço, momentos de remoção de escoramentos e cofragens, entre outras questões. Além das garantias de segurança, pode ainda ser benéfico a nível económico, permitindo uma diminuição de custos.

Após a betonagem, dão-se diversas reações químicas no interior do betão que provocam variações de temperatura e volume. A reação entre o cimento e a água trata-se de uma reação exotérmica, ou seja, está associada à libertação de calor e consequente aquecimento do betão nesta fase, seguindo-se, após o término do processo de hidratação, um período de arrefecimento. O calor gerado é tanto mais significativo quanto maior o volume de betão associado. Na presente dissertação, o calor proveniente da reação de hidratação do cimento não é o ponto fulcral uma vez que as peças em análise possuem dimensões extremamente reduzidas, o que resulta em aumentos de temperatura pouco significativos.

O processo de arrefecimento por evaporação associa-se à chamada entalpia (máxima energia que teoricamente pode ser removida sob a forma de calor) relacionada com a mudança de fase do estado líquido para o gasoso. Esta mudança acarreta, de facto, uma forte remoção de energia da superfície a partir do qual a evaporação se inicia e consequente diminuição de temperatura na mesma. Nas estruturas de betão, este fenómeno tem particular importância no instante em que são removidas as cofragens pois trata-se de uma fase em que o betão se encontra praticamente saturado com água e fica sujeito a uma evaporação abrupta. Durante o arrefecimento podem gerar-se gradientes térmicos significativos que poderão induzir fortes tensões de tração no betão, essencialmente provenientes do impedimento à contração. Como a resistência à tração nas primeiras idades é muito reduzida, esta fase torna-se crítica para o aparecimento de fissuras. A fissuração é um problema extremamente relevante uma vez que, com o aparecimento de fendas, abrem-se novos caminhos para a penetração de agentes agressivos provenientes do exterior, o que tem grande implicação na durabilidade da estrutura.

Embora o arrefecimento por evaporação seja uma realidade presente em todas as peças de betão, são necessárias condições específicas para que ocorra de facto fissuração. Estas condições tornam-se mais favoráveis com o aumento da temperatura e diminuição da humidade relativa, como é o caso de climas desérticos.

O presente trabalho pretende dar um contributo para a compreensão da evolução das tensões associadas ao arrefecimento por evaporação, e para prevenção de cenários de fissuração. Este pode desenvolver informação útil para apoio a situações práticas, tanto na fase de projeto, como na interpretação de aparecimentos precoces de patologias no betão.

1.2. DESCRIÇÃO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Com vista a proporcionar uma melhor compreensão dos fenómenos instalados nas primeiras idades do betão (com principal enfoque nas consequências do arrefecimento por evaporação), e essencialmente após a exposição dos provetes (momento de remoção de cofragem), analisaram-se, com base em procedimentos experimentais, peças devidamente instrumentadas, com variadas dimensões, diferentes idades de desmoldagem e sujeitas a diferentes condições ambientais. Foram efetuados ensaios para aquisição de variações de massa, temperatura e deformações longitudinais em provetes sujeitos aos variados cenários expostos.

Além dos procedimentos experimentais, foram efetuadas simulações numéricas baseadas no Método dos Elementos finitos (MEF) com recurso a um software desenvolvido pela empresa T.N.O, com a colaboração da Universidade de Delft, o DIANA. Com esta etapa de modelação pretende-se validar a correlação existente entre os resultados experimentais e os obtidos computacionalmente.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. O capítulo inicial apresenta uma breve descrição e enquadramento do tema em estudo. Referem-se os fenómenos e problemas envolvidos nas primeiras idades do betão e o impacto que estes podem causar na durabilidade de uma estrutura e na sua vida útil em serviço.

No segundo capítulo dá-se enfoque nas mudanças químicas e físicas que ocorrem logo após a moldagem. Enquadram-se conceitos tais como o calor proveniente da hidratação do cimento e posterior arrefecimento. Aos arrefecimentos estão relacionadas transferências de calor que alteram as características do provete provocando variações volumétricas. Explicam-se ainda alguns parâmetros relacionados com o comportamento térmico, para posterior aplicação em análises numéricas.

O terceiro capítulo assenta na explicação de todo o procedimento prático adotado, equipamentos utilizados e cuidados adicionais.

Os resultados experimentais são apresentados e analisados ao longo do capítulo quatro.

O capítulo cinco descreve o procedimento de modelação numérica e resultados obtidos através do software DIANA.

Por último, o capítulo seis apresenta as conclusões e notas finais a reter. Comparam-se os resultados experimentais com os numéricos e tecem-se considerações finais acerca de todas as análises efetuadas. Sugerem-se ainda propostas de desenvolvimentos futuros no âmbito do tema da dissertação.

2

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ELEMENTOS DE BETÃO

2.1 ALTERAÇÕES POR FATORES INTERNOS NAS PRIMEIRAS IDADES DO BETÃO

A nível interno são diversas as reações que se dão no betão, no entanto, nas primeiras idades, a fundamental influência advém das reações de hidratação do cimento. Ainda no seguimento das reações internas, é de referenciar um fenómeno denominado de retração autogénea. A retração autogénea corresponde a uma redução de volume sem que ocorram trocas de humidade com o meio exterior. É meramente resultado de reações internas dos componentes do betão e é agravada em betões de elevado desempenho onde a razão água-cimento é baixa (Holt, 2001).

Para além deste processo, ocorrem ainda alterações no interior dos elementos de betão através de fenómenos de transferência de calor. De um modo sucinto, estes fenómenos ocorrem sempre que se presenciam diferenças de temperaturas entre sistemas e correspondem a transferências de energia entre eles. O conceito de transferência de calor será explicado de forma mais aprofundada no subcapítulo 2.3.

2.1.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Na presente dissertação, os efeitos da hidratação de cimento não são muito elevados (dada a dimensão dos elementos estudados), no entanto, trata-se de um conceito fundamental que é necessário ter em conta aquando do estudo das propriedades do betão nas primeiras idades. É ainda de referir que, apesar do conceito ser compreendido, existem ainda sérias limitações a nível prático uma vez que o calor de hidratação é um fator que não é tido em conta nos procedimentos correntes de dimensionamento e análise de estruturas de betão.

Para um engenheiro civil, é de conhecimento comum que ao processo de hidratação de cimento está associado um aumento de calor no interior do betão. Quando o cimento é envolvido em água, inicia-se uma reação de hidratação que dá estrutura à pasta de cimento hidratada e começa o desenvolvimento das propriedades mecânicas e características resistentes do betão. No entanto, estas reações são altamente exotérmicas, o que significa que estão associadas a uma elevada libertação de calor, incutindo à peça variações de temperatura não uniformes e gerando temperaturas bastante mais elevadas no interior do que na superfície do betão. Estas alterações de temperatura, quando fora de determinados limites, podem gerar expansões volumétricas significativas seguidas de uma contração. A existência de restrições a estas deformações volumétricas induz o surgimento de fortes tensões devidas às reações

exotérmicas e o cenário mais propício será a fissuração do betão. Este panorama é bastante comum em obras de engenharia civil de grandes massas, como o caso de barragens.

Para prevenção dos efeitos nefastos nas estruturas, causados por calor gerado na hidratação do cimento, existem algumas precauções que podem e devem ser tidas em conta logo na seleção da composição do betão. Como exemplo de medidas preventivas surgem a utilização de cimentos de baixo calor de hidratação (baixo teor em aluminato tricálcico), redução da quantidade de cimento ou utilização de adições (por exemplo escórias de alto forno, cinzas volantes ou sílica de fumo).

2.2 ALTERAÇÕES POR FATORES EXTERNOS NAS PRIMEIRAS IDADES DO BETÃO

Além das alterações térmicas provenientes de reações químicas e fluxos internos, toda a peça de betão, fresco ou endurecido, sofre alterações associadas a agentes exteriores sempre que a humidade relativa e temperatura do ambiente exterior diferem das instaladas no betão. Quando esta é removida, o comportamento térmico da peça, analisado ponto a ponto, sofre uma variação brusca por alteração das condições de fronteira. Quando sujeita a este tipo de alterações, a peça sofre variações não só de temperatura, mas também de comprimento e massa uma vez que o elemento, que inicialmente se encontrava com uma elevada percentagem de água, sujeita-se a um processo de evaporação e vai a libertando até estabilizar. Numa primeira fase a evaporação é mais rápida devido à maior facilidade de evaporação superficial. Numa segunda fase, é expelida a água dos poros mais interiores de um modo mais lento devido à dificuldade de acesso de ar e maior percurso até ao meio exterior. À deformação longitudinal, neste caso encurtamento do elemento do betão, chama-se retração, que pode ter diversas origens.

2.2.1 RETRAÇÃO

O conceito de retração consiste na diminuição de volume num elemento de betão devida, essencialmente à expulsão da água livre existente no mesmo. Para esta redução de volume não são necessárias aplicações de cargas ou deformações impostas exteriormente, a água é expelida livremente para o exterior da peça provocando o seu encurtamento. Além da expulsão de água, a retração pode também estar associada a reações químicas.

A retração total traduz-se na combinação da influência de vários tipos de retração: autogénea, plástica, térmica, de secagem e de carbonatação. Em seguida apresenta-se uma breve descrição de cada um destes fenómenos.

Retração autogénea: deve-se à redução de volume, a partir do momento em que se inicia a hidratação, que se justifica no menor volume de produtos de reação comparativamente ao volume dos materiais que deram origem à mesma (cimento e água).

Retração plástica: ocorre no betão ainda no estado fresco devido à evaporação da água exsudada na sua superfície. Este processo é agravado perante determinadas condições como exposição a fortes circulações de ar, elevadas temperaturas e humidades relativas reduzidas.

Retração térmica: é resultado da diminuição de volume após o processo de hidratação. Numa primeira fase, devido ao carácter exotérmico das reações de hidratação, dá-se uma expansão no interior do betão. Quando a temperatura começa a diminuir, numa fase em que o betão apresenta um módulo de elasticidade crescente, o volume de betão diminui provocando a retração térmica. Este fenómeno é agravado em betões de elevada resistência e em estruturas com grandes volumes de betão.

Retração por secagem: refere-se à redução de volume devido à perda de água do betão. À medida que a água vai sendo expelida, o betão vai sofrendo uma diminuição de volume. Inicialmente escorre a água presente na superfície que em seguida é evaporada para o exterior. Após o desaparecimento da água superficial, o betão continua a ser submetido à expulsão de água em excesso proveniente do interior da peça, até ser atingido o equilíbrio entre a humidade no interior da estrutura e a humidade relativa ambiente.

Retração por carbonatação: é um tipo de retração química que se dá já após a hidratação do cimento e na presença de dióxido de carbono. O efeito é resultado da reação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) com dióxido de carbono (CO_2) dando origem a carbonato de cálcio (CaCO_3) e água (H_2O).

A retração por secagem é, entre os vários tipos referidos atrás, aquela que terá mais importância na presente dissertação, uma vez que é a que, com maior peso, determina a redução de volume após a desmoldagem dos provetes em estudo. O efeito da retração por secagem é sobreposto ao efeito do arrefecimento por evaporação durante as horas que se seguem à remoção da cofragem e fim da cura.

Os efeitos da retração por secagem podem ser considerados em projeto através de extensões de referência uniformes ao longo da peça de betão. No entanto, esta consideração é bastante simplificada uma vez que a evaporação se trata de um processo não linear, que ocorre de um modo progressivo desde a superfície da peça até ao núcleo. Deste modo, as tensões provocadas também não apresentam um desenvolvimento linear devido às variações de volume que se observam (Carvalho, 2017).

A velocidade de secagem é alterada com as condições climáticas envolventes, com a composição, porosidade do betão e geometria do elemento, entre outros fatores. É facilmente compreensível que: quanto mais elevada a temperatura e reduzida a humidade relativa, mais rapidamente se dará a secagem; betões com menor razão água-cimento (por exemplo betões de elevada resistência) têm menor conteúdo de água para evaporar após a hidratação, portanto a sua retração por secagem será inferior; quanto mais poroso for o betão, maior será o teor em água livre e mais rapidamente se efetuam trocas de humidade, o que implica uma secagem mais rápida; quanto maior a superfície exposta à secagem, maior a velocidade com que esta decorre; quanto menor a espessura do elemento, menor será o caminho que a água terá de percorrer desde o núcleo até ao exterior, logo, mais rápida será a secagem.

Com este documento pretende-se ainda entender o efeito da retração por secagem, separadamente de outros tipos de retração. Existem já correlações que colocam em paralelo os efeitos da retração autógena e por secagem distinguindo o peso que cada um destes tem na retração final (Figura1). Entende-se que a retração por secagem é um processo bastante demorado quando comparado com a retração autógena e a sua estabilização (momento em que se atingem teores de água suficientemente reduzidos) pode demorar anos a ocorrer.

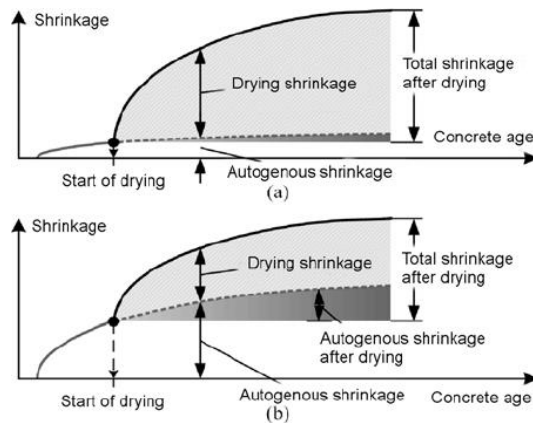


Figura 1 - Extensões devido à retração autógena e de secagem em betões (Gribniak et al. 2007). a) de resistência normal; b) de elevada resistência.

2.3 MODELO TÉRMICO: ALTERAÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURAS POR FENÓMENOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Como referido nos subcapítulos anteriores, nas primeiras idades o betão sofre fortes alterações a nível térmico. Estas alterações podem ter diversas origens tais como as reações químicas internas no elemento ou alteração de condições de fronteira. Tanto isolando a peça, como tendo em conta efeitos exteriores, sempre que existam diferenciais de temperatura entre dois pontos, ocorrem fenómenos de transferência de calor.

2.3.1 MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor consiste num processo através do qual é transferida energia térmica entre dois sistemas. Isto acontece sempre que exista um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou, quando dois sistemas a diferentes temperaturas entram em contacto. Deste modo, a energia tende a propagar-se do sistema com temperatura mais elevada para o sistema de menor temperatura, até ambos entrarem em equilíbrio térmico. À quantidade de energia térmica transferida numa unidade de tempo, chama-se calor. A transferência de calor ocorre, em cada situação do dia-a-dia, através da combinação de três fenómenos (Figura 2): i) condução, ii) convecção, iii) radiação. Estes três fenómenos não ocorrem isoladamente, contudo, é comum serem analisados simplifadamente de modo isolado.

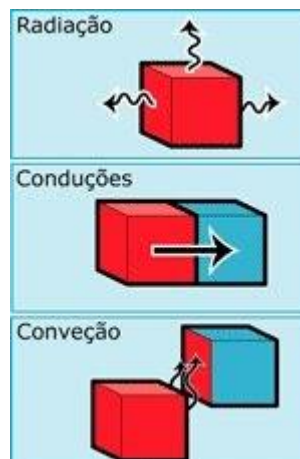


Figura 2 - Exemplos práticos dos três modos de transferência de calor (Salmoni, 2009).

2.3.2 CONDUÇÃO

A transferência de calor por condução consiste na transferência de energia através de uma substância sólida ou fluido estático (líquido ou gás), como resultado da presença de diferenciais de temperatura no interior da substância (Figura 3). Esta transferência é resultado da deslocação aleatória de átomos, moléculas e/ou eletrões presentes na substância.

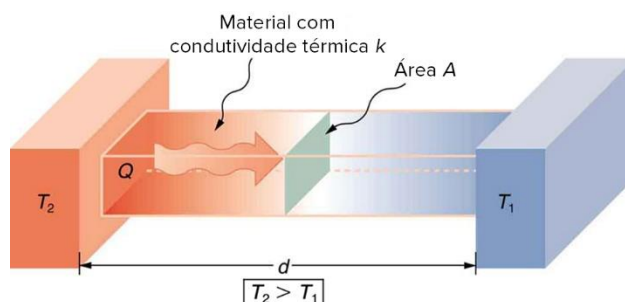


Figura 3 - Representação esquemática da transferência de calor por condução entre dois sistemas a diferentes temperaturas (Boundless, 2014).

2.3.2.1 Lei de Fourier em regime estacionário

A transferência de calor por condução considera-se que ocorre em regime estacionário quando a diferença de temperatura entre um sistema e o outro é constante. Deste modo, passado um determinado período de tempo, atinge-se um equilíbrio tal que a distribuição espacial das temperaturas se mantém constante. Assim, as derivadas parciais da temperatura em relação ao espaço representam valores não nulos enquanto as derivadas em relação ao tempo são nulas.

A obtenção da taxa de transferência de calor por condução em regime estacionário e para o caso unidimensional assenta na lei de Fourier que é dada pela Equação (2.1).

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

onde,

q''_x : fluxo de calor através de uma superfície por unidade de área (W/m^2);

q_x : fluxo de calor (W);

A : área atravessada pelo fluxo de calor (m^2);

k : condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$);

T : temperatura (K);

x : coordenada espacial na direção do escoamento de calor (m).

Desenvolvendo-a para o caso tridimensional, a Equação (2.1) assume a forma generalizada da Equação (2.2).

$$q'' = -k\nabla T = -k\left(i\frac{\partial T}{\partial x}\right)\left(j\frac{\partial T}{\partial y}\right)\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.2)$$

onde,

x, y, z : coordenadas espaciais correspondentes ao sistema de eixos de referência;

i, j, k : versores do sistema de eixos de referência;

O sinal (-) resulta do facto de o fluxo se dar no sentido de temperatura descendente, ou seja, do ponto de maior para menor temperatura.

2.3.2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma característica dos materiais homogéneos que corresponde à quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma camada de espessura e área unitárias desse material quando existe uma diferença de temperatura de 1°C entre as suas duas faces opostas. Este parâmetro caracteriza a facilidade com que se dão as trocas de calor por condução por parte dos materiais. Quanto maior a condutividade do material, maior será a facilidade com que este executará os processos de transferência de calor por condução. O Quadro 1 apresenta valores expectáveis de condutividades térmicas de alguns materiais correntes.

Quadro 1 - Exemplo de condutividades térmicas de alguns materiais (Young, 1992).

Material	Condutividade térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Cobre	385
Alumínio	205
Aço	50,2
Vidro	0,8
Água a 20°C	0,6

No que diz respeito ao betão, a condutividade térmica é variável de acordo com o betão em causa. Parâmetros como a idade do betão, grau de saturação, temperatura e composição (volume e tipo de agregados, razão água/cimento, etc.) podem dar origem a diferentes condutividades. Para betão endurecido, aproximadamente a 20°C, são sugeridos diferentes intervalos de valores para este parâmetro. De acordo com Breugel (1980, 1998) a condutividade térmica do betão deve variar entre 1,2 e 3,5 Wm⁻¹K⁻¹, entre 2,5 e 2,9 Wm⁻¹K⁻¹ de acordo com o Instituto Japonês de Betão (1985), entre 1,4 e 3,6 Wm⁻¹K⁻¹ de acordo com Neville (1995) ou entre 1,2 e 2,4 Wm⁻¹K⁻¹ de acordo com Silveira (1996).

Lura e Breugel (2001) propõe uma forma de estimar a condutividade térmica do betão através de uma média ponderada das condutividades térmicas dos constituintes da mistura, recorrendo à Equação (2.3).

$$k = \frac{W_{cem}k_{cem} + W_{agg}k_{agg} + W_wk_w}{W_{cem} + W_{agg} + W_w} \quad (2.3)$$

onde,

k : condutividade térmica da mistura ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$);

W_{cem} , W_{agg} , W_w : massa de cimento, agregados e água, respetivamente (Kg/m^3);

k_{cem} , k_{agg} , k_w : condutividade térmica do cimento, agregados e água, respetivamente ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

O Quadro 2 apresenta valores da condutividade térmica para a combinação de materiais utilizados (água, cimento e agregados de origem granítica) e ambientes simulados na presente dissertação (ambiente ameno na ordem dos 20°C e ambiente mais quente, com cerca de 35°C).

Quadro 2 - Condutividade térmica de alguns materiais envolvidos na composição do betão a temperaturas de referência (Breugel, 1980).

Material	Condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	
	21,1 °C	32,2 °C
Água	0,6	0,6
Cimento	1,23	1,27
Granito	3,03	2,90

Apesar da condutividade térmica não apresentar um valor constante (varia com o grau de hidratação do betão), admite-se, nas análises realizadas nesta dissertação, que a sua variação pode ser desprezada, uma vez que a análise em causa tem uma duração temporal muito reduzida (algumas horas).

2.3.2.3 Lei de Fourier em regime variável

Na realidade surgem diversos casos em que os sistemas não permanecem sempre a temperaturas invariáveis. Muitas vezes dão-se alterações de temperatura repentinas (por exemplo por indução de uma fonte de calor) sem que haja tempo para o fluxo de calor se adaptar às novas temperaturas induzidas. Nestes casos, o fluxo varia com o tempo até se atingir novamente uma situação de regime estacionário. Quando tal acontece, o regime designa-se por variável e pode ser descrito por uma nova forma da lei de Fourier (Equação (2.4)). Esta equação representa uma forma mais geral da equação de Fourier e permite a obtenção das temperaturas em função das coordenadas espaciais do sistema de eixos de referência e em função do tempo (Azenha, 2004). Inclui também o efeito da geração interna de calor, associada por exemplo à hidratação do cimento.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

onde,

\dot{Q} : taxa de geração de energia por unidade de volume (W/m^3);

ρc : calor específico volumétrico ($\text{J/m}^3\text{K}$);

Para melhor compreensão da equação atrás exposta, apresenta-se em seguida uma breve descrição dos conceitos nela envolvidos.

2.3.2.4 Calor específico

O calor específico, c , é a quantidade de calor que deve ser fornecida a um elemento para que uma unidade de massa dessa substância aumente uma unidade de temperatura. Este parâmetro varia com diversos fatores tais como o volume e tipo de agregados, razão água/cimento, temperatura e grau de hidratação (De Schutter 2001). O intervalo de variação do calor específico do betão endurecido é sugerido por Breugel (1998) entre 850 e 1150 $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ou entre 840 e 1170 $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ por Neville (1995) e Silveira (1996).

Do mesmo modo que a condutividade térmica, o calor específico do betão pode ser estimado através da média ponderada do calor específico dos seus constituintes, através da Equação (2.5) proposta por Breugel (1980), Lura (2001) e Ruiz *et al.* (2003). Esta equação fornece uma estimativa da evolução deste parâmetro em função do grau de hidratação.

$$c = \frac{W_{cem}c_{cem} + W_{agg}c_{agg} + W_w c_w - c_{bindW}W_{cem}\alpha c_w}{W_{cem} + W_{agg} + W_w} \quad (2.5)$$

onde,

c : Calor específico da mistura ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$);

W_{cem} , W_{agg} , W_w : Massa de cimento, agregados e água, respetivamente (Kg/m^3);

c_{cem} , c_{agg} , c_w : Calor específico do cimento, agregados e água, respetivamente ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$);

c_{bindW} : coeficiente que tem em conta a influência da água química e fisicamente ligada ($c_{bindW}=0,2$);

α : grau de hidratação.

O grau de hidratação é um conceito usualmente utilizado para caracterizar o avanço das reações químicas envolvidas na hidratação do cimento (Azenha, 2009). Este parâmetro varia com o tempo e consiste no rácio entre a quantidade de cimento que já reagiu até ao instante de tempo t e a quantidade total de cimento no instante inicial ($t=0$). O grau de hidratação pode ser estimado indiretamente por diversos métodos (muitos destes descritos em Breugel (1991) e Parrott *et al.* (1990)) mas a sua determinação direta é fisicamente impossível. A Equação (2.5) prevê uma relação linear entre o grau de hidratação e o calor específico.

O calor específico dos constituintes da mistura pode ser calculado, em função da temperatura, pelas Equações (2.6) a (2.8) (que não têm em conta o tipo de agregado), ou, em alternativa, retirados diretamente do Quadro 3 (resultados obtidos empiricamente).

$$c_{cem} = 0.1812 \sqrt{T} + 2.618T + 431 \text{ (Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)} \quad (2.6)$$

$$c_{agg} = 0.0604 \sqrt{T} + 0.468T + 662 \text{ (Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)} \quad (2.7)$$

$$c_w = 4186 \text{ (Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)} \quad (2.8)$$

Note-se que a temperatura, T , apresentada na equação, é introduzida em °C, apesar de o valor do calor específico resultar em $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Quadro 3 - Calor específico de alguns materiais envolvidos na composição do betão a temperaturas de referência (Breugel, 1980).

Material	Calor específico (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	
	21,1 °C	32,2 °C
Água	4187	4187
Cimento	456	536
Granito	716	708

O calor específico volumétrico, ρc , corresponde ao produto entre o calor específico e a massa específica do material. Este parâmetro permite analisar a capacidade de armazenamento de energia do material.

2.3.2.5 Geração interna de calor

A taxa de geração de energia por unidade de tempo e por unidade de volume, \dot{Q} , representa a taxa de desenvolvimento do calor produzido nas reações exotérmicas associadas à hidratação do cimento. Este parâmetro pode ser obtido experimentalmente e descrito pela Equação (2.9).

$$\dot{Q} = f(\alpha_T) A_T e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2.9)$$

onde,

$f(\alpha_T)$: função da geração de calor;

A_T : constante proporcional à máxima taxa de geração de calor;

E_a : energia de ativação aparente;

R : constante universal dos gases perfeitos (8,314 Jmol⁻¹K⁻¹).

O parâmetro α_T consiste no grau de geração de calor e é obtido pelo rácio entre o valor acumulado de calor gerado até um dado instante “ t ” e o valor acumulado de calor gerado no final do processo de hidratação do cimento.

2.3.3 Convecção

A convecção ocorre quando existe um diferencial de temperatura entre a superfície de um sólido e um fluido em movimento (Figura 4). A grande diferença relativamente à condução assenta no facto do processo de transmissão ser propagado mediante o transporte de matéria, o que implica que exista um gás ou líquido em movimento.

Os modos de transferência de energia através deste mecanismo dão-se essencialmente através do movimento molecular aleatório (difusão) ou do movimento macroscópico do fluido (Azenha, 2004).

As correntes de convecção estão sempre relacionadas com diferenças de pressão. Quando estas provêm apenas das diferenças de densidades em virtude das diferenças de temperaturas (ar mais quente tende a subir), o processo de convecção diz-se natural ou livre. Quando estão incluídos meios de propagação de fluidos não naturais (agentes exteriores como o caso de ventos ou ventoinhas), o processo de convecção designa-se como forçado. Além destes dois, existe ainda a convecção por ebulição ou por condensação.

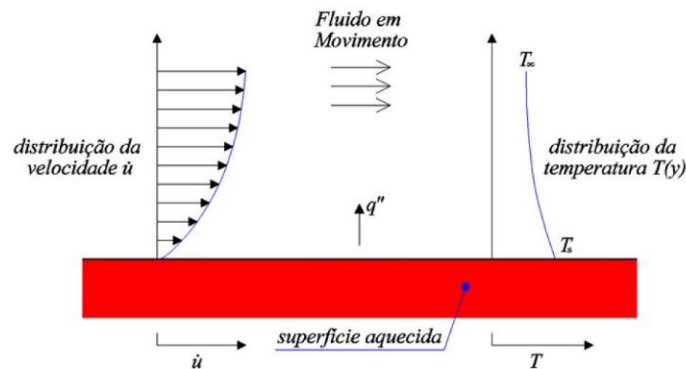


Figura 4 - Representação esquemática de um sólido sujeito a correntes de convecção (Azenha, 2004).

O fenómeno de convecção pode ser calculado através da lei do arrefecimento de Newton (Equação (2.10)).

$$q_{h,c} = h_c(T_{sup} - T_{amb}) \quad (2.10)$$

onde,

$q_{h,c}$: fluxo de calor na superfície (W/m^2);

h_c : coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$);

T_{sup} : temperatura da superfície (K);

T_{amb} : temperatura do ambiente envolvente (K).

O coeficiente de convecção varia com diversos fatores, por exemplo, geometria da superfície exposta, tipo de convecção, tipo de fluido, diferença de temperaturas, entre outros.

2.3.4 Radiação

A radiação é o processo de transferência de calor relacionado com a propagação de ondas eletromagnéticas. Ao contrário da condução e da convecção, que necessitam de meios específicos para que se dê a sua propagação, a radiação ocorre em qualquer meio, inclusive no vácuo. A radiação térmica corresponde portanto, à radiação eletromagnética irradiada por um corpo como consequência da sua temperatura.

No que diz respeito à radiação, um corpo opera continuamente em função de três interações: transmissão, absorção e reflexão (Figura 5). O somatório destes três efeitos corresponde à unidade (Equação (2.11)).

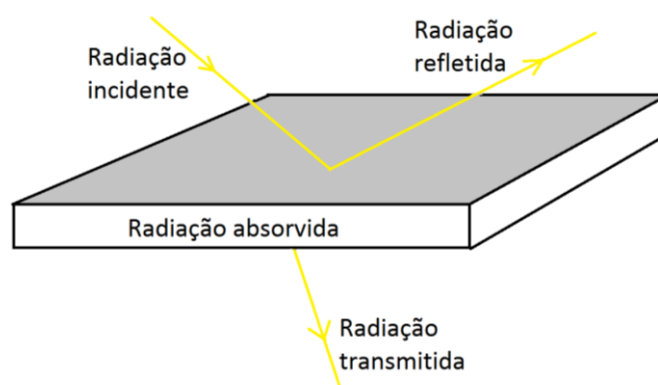


Figura 5 - Interação entre a energia emitida por radiação e o material atingido.

$$\alpha_R + \rho_R + \tau_R = 1 \quad (2.11)$$

onde,

α_R : absorvidade;

ρ_R : refletividade;

τ_R : transmissividade.

O calor transmitido por radiação e por unidade de área designa-se radiância (E) e pode ser calculado pela Equação (2.12).

$$E = \varepsilon_R \sigma_R T^4 \quad (2.12)$$

onde,

ε_R : emissividade (parâmetro entre 0 e 1);

σ_R : constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$);

T : temperatura da superfície (K).

O fluxo de calor por radiação pode ainda ser calculado substituindo-se na Equação (2.10) o coeficiente de transferência de calor por convecção por um coeficiente correspondente ao mecanismo de radiação, assumindo a equação a mesma forma. No entanto, o que acontece na realidade das estruturas de betão é uma exposição a ambos os mecanismos. O betão sujeita-se em simultâneo a fenómenos de convecção (estando a superfície em contacto com ar ou água a diferentes temperaturas) e fenómenos de radiação (essencialmente radiação solar). Deste modo, a equação pode ser generalizada, sendo que o coeficiente de transferência de calor, h , assume a contribuição dos dois efeitos.

$$q_h = h(T_{sup} - T_{amb}) \quad (2.12)$$

2.4. TRANSFERÊNCIA DE CALOR DEVIDO AO ARREFECIMENTO POR EVAPORAÇÃO

2.4.1 FLUXO DE CALOR DEVIDO AO ARREFECIMENTO POR EVAPORAÇÃO

Em muitas estruturas, após a betonagem, ocorre exsudação. Isto acontece uma vez que a água é o componente da mistura com menor peso específico, o que leva ao assentamento das restantes partículas e subida da água para a superfície. Quando isto ocorre, surge na superfície do betão uma película de água que tende a evaporar com o tempo.

Tendo em conta que a taxa de evaporação depende do método de cura utilizado, em alguns casos utilizam-se métodos de cura e cuidados específicos (por exemplo, utilização de membranas ou outros elementos para cobertura, nebulização de água, etc.) para minimizar a evaporação precoce. De qualquer modo, existirá sempre água superficial livre e com maior facilidade de evaporação. Outros fatores como a textura da superfície e a composição do betão interferem também na velocidade de evaporação.

Para casos onde o elemento ainda possui cofragem, quando esta é retirada, começa a evaporação da película superficial de água no betão, seguindo-a a água contida no interior dos seus poros. A evaporação dá-se enquanto exista água livre de ser expelida, até a massa de betão estabilizar.

Quando se dá a evaporação da água superficial, liberta-se energia sob a forma de calor latente, o que provoca um arrefecimento na superfície. Este decréscimo de temperatura é designado por arrefecimento por evaporação. Tome-se por analogia o corpo humano. Quando sujeito a elevadas temperaturas, o corpo transpira. Mais tarde, os fluidos produzidos pela transpiração acabam por evaporar causando uma sensação de arrefecimento (Schindler, 2002). O mesmo acontece à pele molhada, mesmo quando a molhagem não resulta de transpiração.

A energia dissipada por arrefecimento por evaporação é dada pela Equação (2.13) (ASHRAE, 1993).

$$q_{evap} = -E_c h_{lat} \quad (2.13)$$

onde,

q_{evap} : fluxo de calor devido ao arrefecimento por evaporação (W/m²);

E_c : taxa de evaporação de água da superfície de betão (kg/m²/s);

h_{lat} : calor latente de evaporação (J/kg).

O calor latente de evaporação representa a quantidade de calor, em Joule, necessária para que seja evaporado um grama de água. De acordo com ASHRAE (1993) e Schindler (2002), o parâmetro pode ser calculado pela seguinte equação:

$$h_{lat} = 2.500.000 + 1859 T_s \quad (2.14)$$

onde,

T_s : temperatura da superfície de água (°C).

Al-Fadhala e Hover (2001) propuseram uma equação que relaciona a taxa de evaporação numa superfície de betão (E_c), com a taxa de evaporação numa superfície livre (E_w), como por exemplo um lago ou um recipiente com água onde toda a superfície está coberta com água:

$$\frac{E_c}{E_w} = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^{1,5}} \quad (2.15)$$

onde,

E_c : taxa de evaporação da superfície de betão ($\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$);

E_w : taxa de evaporação de uma superfície livre de água ($\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$);

t : idade do betão (h);

a : constante que, de acordo com a proposta destes autores, toma os valores 3,75 horas para betão e 6,16 horas para argamassas.

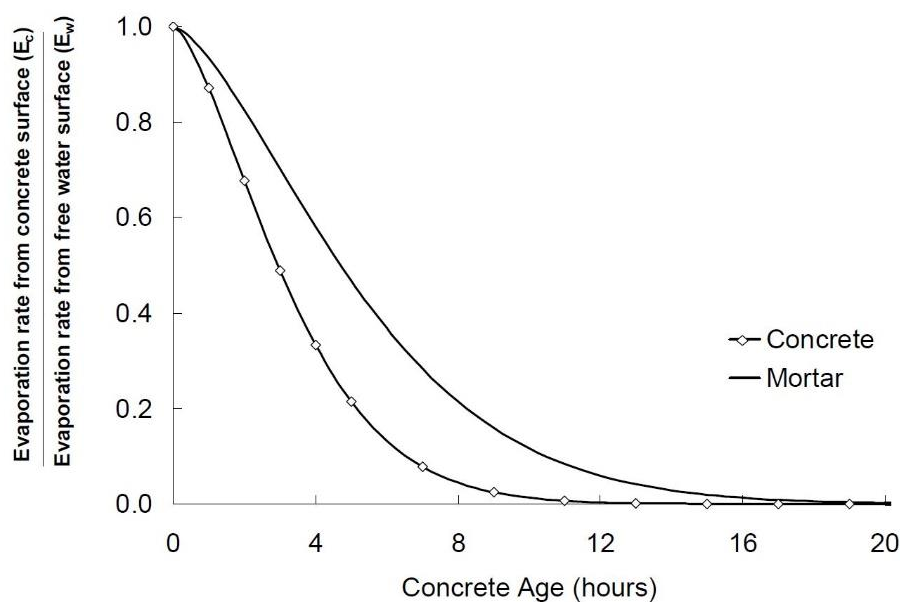


Figura 6 - Desenvolvimento de E_c/E_w de acordo com a proposta de Al-Fadhala e Hover's (2001) para betões e argamassas.

A Figura 6 ilustra a Equação (2.15). Foi obtida experimentalmente não tendo em conta a interferência da rugosidade da superfície e o método de cura utilizado. Pela análise da figura nota-se que a taxa de evaporação sofre um forte decréscimo à medida que se processa a evaporação. No momento inicial o rácio parte de 1, ou seja, o betão está inteiramente coberto de água.

2.4.2 TRABALHOS PRÉVIOS PARA AVALIAR OS EFEITOS DO ARREFECIMENTO POR EVAPORAÇÃO

Num estudo de Kovler (1995), dedicado ao problema do arrefecimento por evaporação, foram analisados casos extremos em que finos elementos de betão (secção transversal de 40x40 mm) foram expostos a um ambiente quente e seco logo após a desmoldagem. O propósito do estudo incide na determinação da deformação de origem térmica adicionada à retração de secagem em elementos de livre deformação (não restringidos). O projeto englobou ainda a determinação das tensões desenvolvidas em elementos restringidos para comparação com a resistência à tração do material.

Elementos de betão foram moldados e, ao 1 dia de idade, expostos à secagem num ambiente de $30 \pm 1^\circ\text{C}$ e $35 \pm 3\%$ de humidade relativa, onde permaneceram durante uma semana. Ao longo do programa foram realizados ensaios de perda de massa, deformação em elementos não restringidos e variação de temperatura. A Figura 7 representa os resultados obtidos que se consideram mais relevantes no que respeita ao âmbito da presente dissertação.

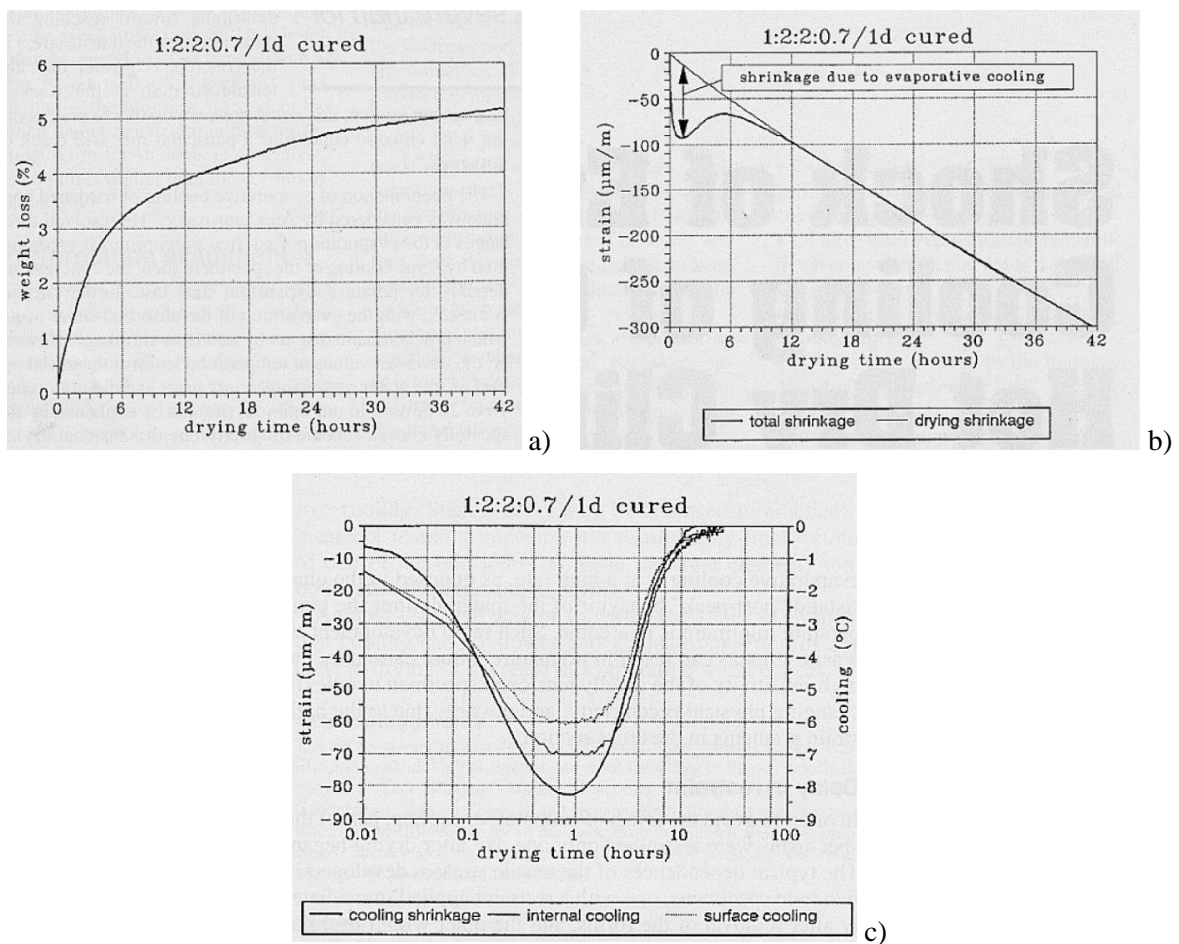


Figura 7 - Resultados experimentais do estudo *Shock of Evaporative Cooling of Concrete in Hot Dry Climates* (Kovler, 1995). a) Perda de massa; b) deformação total e deformação por efeito de secagem calculada; c) deformação longitudinal devida ao arrefecimento e variações de temperatura internas e à superfície.

Da análise dos resultados obtidos experimentalmente, foi possível obter as seguintes conclusões:

- O máximo efeito do arrefecimento por evaporação em elementos finos de betão e expostos a este tipo de ambiente dá-se aproximadamente uma hora após a desmoldagem.
- A deformação longitudinal nas primeiras horas após desmoldagem é provocada apenas pela influência térmica devida ao arrefecimento por evaporação.
- Observa-se que ao final de 12 horas após a secagem, a temperatura estabiliza e o seu efeito nas restantes análises desaparece.

3

PROGRAMA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 INTRODUÇÃO

Com vista a avaliar o arrefecimento por evaporação nas primeiras horas após a moldagem foram simuladas diversas condições com as seguintes variáveis: dimensões dos provetes, condições ambientais e idades de remoção de cofragem. Para cada combinação de condições estabelecida, após a remoção da cofragem e membranas impermeabilizantes, foram avaliadas repetidamente as temperaturas instaladas no interior do betão, as variações de massa e de deformações longitudinais. Estas três grandezas podem ser correlacionáveis entre si no âmbito do arrefecimento por evaporação, apoiando a interpretação de resultados de modelação numérica. A evolução da perda de massa é um procedimento fundamental para que sejam avaliadas as taxas de evaporação nos diferentes ambientes e o seu respetivo potencial de evaporação.

Durante as medições, por simplificação, não foram contabilizados os fluxos de ar em movimento nas proximidades dos provetes, dada a não perceção dos mesmos.

Para as medições de temperatura foram utilizados pelo menos dois sensores do tipo Pt100 por provete, inseridos no centro geométrico da sua secção transversal e a 5 mm da superfície interior do molde. Todos os sensores foram colocados aproximadamente a meia altura do provete para não resultarem fortes interferências provenientes da evaporação pelos topos. Com esta disposição, pretende-se caracterizar a evolução da temperatura junto à superfície e no núcleo do provete.

De modo a garantir a axi-simetria da secagem, todos os provetes possuem secção circular constante. O Quadro (4) apresenta as diferentes combinações de dimensões utilizadas. Para a definição da geometria do provete, foram utilizados tubos em PVC com um determinado diâmetro exterior ($D_{\text{comercial}}$) e uma determinada espessura, o que resulta num diâmetro interior correspondente ao diâmetro final do provete.

Quadro 4 - Geometrias dos provetes ensaiados.

D_{comercial} (mm)	D_{interior} (mm)	Comprimento (cm)	$\frac{\text{Área da secção transversal}}{\text{Volume do provete}}$	$\frac{\text{Comprimento}}{\text{Diâmetro}}$
50	47	25	0.00400	5.32
50	47	65	0.00154	13.83
110	104	25	0.00400	2.40
110	104	65	0.00154	6.25
160	151	25	0.00400	1.66

Os provetes de 25 cm de comprimento são afetos às medições de temperatura e massa enquanto os de 65 cm se destinaram às medições de deformações longitudinais. Esta variação deve-se ao facto de ser necessário um maior comprimento possível, para se obterem deslocamentos significativos. A seleção dos 65 cm corresponde ao comprimento máximo disponível na estrutura de suporte às medições.

De um modo geral, por questões de logística, nenhum provete deve possuir dimensões exageradas de forma a facilitar o transporte e rapidez durante as medições manuais e, além disso, respeitar as gamas de medição das balanças disponíveis.

Relativamente aos diâmetros utilizados, pretende-se que a evaporação seja significativa, portanto seleccionaram-se peças de reduzidas espessuras equivalentes devido à menor inércia térmica do betão do núcleo da peça.

No que diz respeito às condições ambientais, foram utilizados dois espaços distintos, com temperatura e humidade controláveis e aproximadamente estáveis. O primeiro, designado por ambiente 1, representa temperaturas bastante mais elevadas do que o ambiente 2 e foi programado para permanecer a 35°C e 45±5% de humidade relativa. Já o ambiente 2, foi simulado numa câmara existente no laboratório com condições de temperatura e humidade constantes, que não se consideram muito afastadas de cenários usualmente registados em Portugal. Surge, deste modo, um ambiente ameno com temperatura de 20°C e cerca de 50% de humidade relativa. Apesar de este apresentar um caso mais corrente no país, o primeiro não se trata de um caso impraticável na construção civil em Portugal. Em dias mais quentes, e principalmente no sul do país, é muito comum ocorrerem casos semelhantes ao ambiente 1, ou ainda mais agressivos (temperaturas superiores e/ou humidades relativas inferiores).

Por último, em relação às idades adotadas para remoção de cofragens optou-se por remoções aos 3 e 7 dias, as quais se consideram ainda idades jovens do betão e casos bastante comuns em obra.

O Quadro (5) apresenta, de modo sintetizado, o esquema de ensaios a partir dos quais resultaram medições consideradas válidas. A cada algarismo representado a cor cinza, corresponde o número de provetes com resultados utilizados nas análises inseridas no capítulo 4. Ao longo do documento, aquando da utilização da nomenclatura D3 ou D7, assume-se que corresponde a uma situação de desmoldagem ao terceiro ou sétimo dia, respetivamente.

Quadro 5 – Esquema de ensaios associados a resultados válidos.

AMBIENTE	TIPO DE MEDIÇÃO	DIA DE DESMOLDAGEM	DIÂMETRO DO PROVETE	DATA DE MOLDAGEM				
				23/04/2018	07/05/2018	15/05/2018	29/05/2018	05/06/2018
AMBIENTE 1 (35°C)	ΔM	D3	$\Phi 47$	2				
			$\Phi 104$					
		D7	$\Phi 47$	2				
			$\Phi 104$	2				
	ΔT	D3	$\Phi 47$			2		
			$\Phi 104$				2	
			$\Phi 151$				1	
		D7	$\Phi 47$			2		
			$\Phi 104$			2		
			$\Phi 151$			1		
		D3	$\Phi 47$			1	1	
			$\Phi 104$			1	1	
		D7	$\Phi 47$				1	
			$\Phi 104$			1	1	
AMBIENTE 2 (20°C)	ΔM	D3	$\Phi 47$	2				
			$\Phi 104$					
		D7	$\Phi 47$	2				
			$\Phi 104$	2				
	ΔT	D3	$\Phi 47$		2			
			$\Phi 104$					2
			$\Phi 151$					1
		D7	$\Phi 47$		3			
			$\Phi 104$		2			
			$\Phi 151$					
	$\Delta \epsilon$	D3	$\Phi 47$					1
			$\Phi 104$					1
		D7	$\Phi 47$		1			1
			$\Phi 104$		1			

3.2 PREPARAÇÃO EXPERIMENTAL

Antes de se avançar com o procedimento experimental propriamente dito, foi necessário dedicar um longo período de tempo à experimentação de diferentes hipóteses de modo a selecionar as metodologias, materiais e equipamentos mais adequados a cada caso de estudo.

Esta fase teve enfoque essencialmente em três parâmetros: composição do betão, medições de temperaturas e de deformações longitudinais. Visto que se tratam de medições com recurso a métodos automáticos, tiveram de ser previamente testadas diferentes alternativas tendo em vista a sua validação. Relativamente à instrumentação para obtenção de temperaturas e deformações, o procedimento será detalhado futuramente no presente capítulo. No que concerne à composição do betão, tecem-se as seguintes considerações:

- Pretende-se que o betão em análise represente um betão de resistência normal, que seja frequentemente utilizado em obras correntes de engenharia civil.
- A dimensão máxima de agregado deve ser compatível com as dimensões de provetes pretendidas (limitar a dimensão máxima devido às reduzidas dimensões dos provetes).
- O betão deve poder ser vibrado sem que ocorra segregação (classe de consistência S2, que corresponde a um abaixamento no cone de Abrams entre 50 mm e 90 mm).

3.2.1 COMPOSIÇÃO DO BETÃO E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A fim de se obter um betão de acordo com as considerações acima citadas, realizaram-se amassaduras experimentais de volumes reduzidos (mas suficientemente elevados de modo a garantir uma correta utilização da misturadora sem heterogeneidades significativas). Em concreto, as amassaduras experimentais envolveram o fabrico de 25 l de betão.

Para cada amassadura foram realizados testes de abaixamento e moldados cubos para avaliação da resistência à compressão do betão. Com base nestes resultados a composição foi sequentemente ajustada até se alcançarem os resultados desejáveis.

Como ponto de partida utilizou-se o método de Faury. No final deste processo iterativo resultou a composição apresentada no Quadro 6 (kg/m³ de partículas saturadas com superfície seca):

Quadro 6 - Composição de betão utilizada.

Componente	Quantidade (kg/m ³)
Brita 4-8	919
Areia 0-4	459
Areia 0-2	459
Cimento	350
Água	156
Superplastificante	1,433

Desta composição resultam uma razão água/cimento de 0,449 e percentagem de superplastificante em relação à quantidade de cimento de 0,409%.

Relativamente aos materiais constituintes do betão, foram utilizadas britas e areias naturais, ambas de origem granítica, existentes em stock no laboratório, com as curvas granulométricas representadas na Figura 8. A Figura representa ainda a curva granulométrica resultante da mistura dos agregados e a curva de Faury utilizada no ajuste da composição seleccionada.

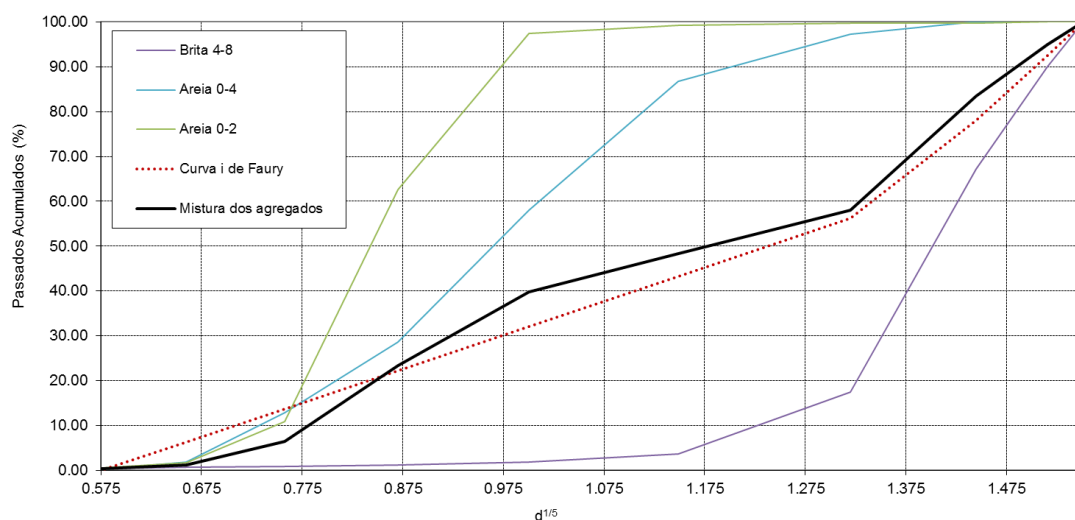


Figura 8 – Curvas granulométricas dos agregados e respectiva mistura.

O cimento utilizado trata-se de um cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5N da marca SECIL. Este cimento é dos mais utilizados em Portugal nas obras de construção civil dada a sua boa trabalhabilidade e baixo calor de hidratação. Por último, o superplastificante em questão trata-se do Viscocrete 3008.

O ensaio de abaixamento, tipicamente conhecido como *Slump Test*, respeitou os procedimentos e considerações referidas na norma NP EN 12350-2 (2009) e foi realizado durante as amassaduras experimentais, analisando-se a consistência do betão e comparando-a com a desejada. Em suma, o ensaio consiste na inserção do betão num molde tronco-cónico normalizado. O molde é enchido em três fases (com o auxílio de um funil) e em cada uma delas, sujeito a 25 pancadas por parte de um varão de compactação. Após o enchimento do molde, este é retirado na vertical e é medida a diferença entre a altura do molde e o ponto mais elevado da amostra que assentou. A Figura 9 representa alguns dos procedimentos anteriormente descritos.



Figura 9 - Fases da realização do ensaio de abaixamento. a) Compactação da primeira camada; b) enchimento do molde; c) medição do abaixamento.

Feita a correta cura e desmoldagem dos provetes destinados ao ensaio de resistência à compressão ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$), ao 1º dia de idade, realizou-se o ensaio de massa volúmica do betão endurecido (Figura 10). Este ensaio correspondeu a uma simplificação da norma NP EN 12390-7 (2009) e consistiu na pesagem de cada provete ao ar livre (massa do provete tal como recebido) e completamente submerso em água a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (a balança é deixada estabilizar e o valor deve ser registado o mais rapidamente possível para que não haja absorção significativa de água pelo provete). A diferença entre a massa ao ar livre e submersa corresponde ao volume de água deslocado. Assim sendo, a massa volúmica obedece à Equação (3.2)

$$\rho = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \quad (3.2)$$

onde,

ρ : Massa volúmica (kg/m^3);

W_1 : Massa do provete tal como recebido (kg);

W_2 : Massa do provete submerso (kg).

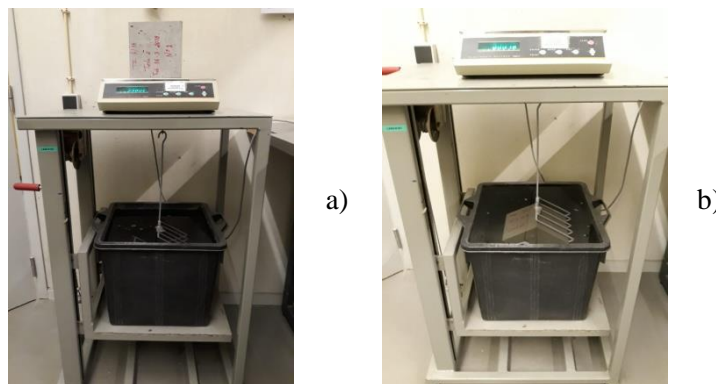


Figura 10 - Ensaio de massa volúmica. a) Pesagem do provete ao ar livre; b) pesagem do provete submerso.

Por último, realizou-se o ensaio de resistência à compressão. Este foi efetuado aos dias 3, 7 e 28 dias após a betonagem. O ensaio obedece à norma NP EN 12390-3 (2011). A forma e dimensão dos provetes respeitam a norma EN 12350-1 sendo que, neste caso particular, foram moldados cubos com aresta de 150 mm. Se o molde estiver corretamente retificado, as dimensões do provete deverão estar em conformidade com tolerâncias estabelecidas (tolerâncias estas verificadas para todos os provetes antes de se proceder ao ensaio). O provete deve ser centrado na máquina de ensaio para que o carregamento seja efetuado perpendicularmente à direção de moldagem. É então aplicada uma carga a velocidade constante no intervalo de $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$. Seguidamente à aplicação de uma carga inicial (que não deve ser superior a 30% da carga de rotura) esta vai aumentando até à máxima força passível de ser aplicada. A rotura é considerada satisfatória quando o cubo apresenta fendas que partem dos cantos e se direcionam para uma zona mais central do provete (representando o efeito de cintagem) como apresentado na Figura 11. A resistência à compressão é dada pelo quociente entre a carga máxima na rotura e a área da secção transversal do provete

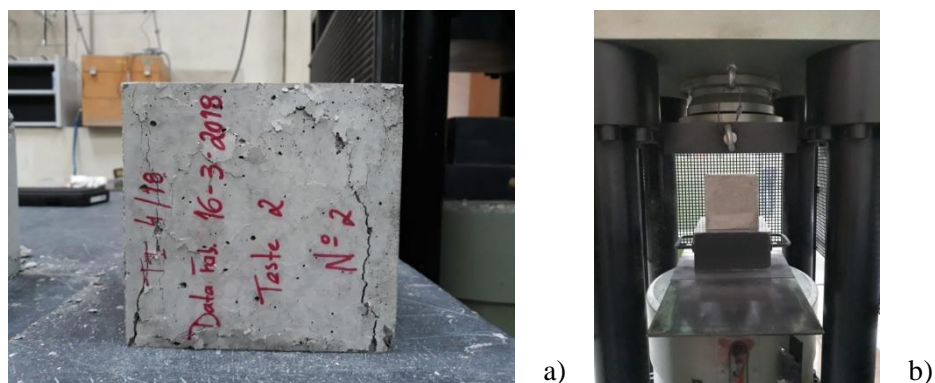


Figura 11 - Ensaio de resistência à compressão. a) Modo de rotura satisfatório; b) equipamento de ensaio.

O betão obtido cumpriu todas as condições acima impostas registando valores de *slump* correspondentes a uma classe S2 e massa volúmica na ordem de 2300 kg/m^3 . A cura do betão foi efetuada numa câmara com temperatura aproximadamente constante de 20°C e humidade relativa não inferior a 97%.

O Quadro 7 apresenta os resultados dos ensaios de abaixamento e resistência à compressão efetuados para cada amassadura. As células não preenchidas implicam a não realização do ensaio nessa data. Em certas circunstâncias, por questões de limite da capacidade da betoneira, não foram moldados cubos para uma caracterização completa dos valores de resistência à compressão.

Quadro 7 – Resultados dos ensaios de abaixamento e resistência à compressão para cada amassadura efetuada.

Data amassadura	23/04/2018	07/05/2018	15/05/2018	29/05/2018	05/06/2018
Slump (mm)	110	60	70	70	60
fc,3 (MPa)				21	21.8
				19.2	20.9
fc,7 (MPa)				24.5	27.2
				24.2	26
fc,28 (MPa)				29.9	33.3
				31.2	

3.2.2 PREPARAÇÃO DA BETONAGEM DOS PROVETES PARA AVALIAÇÃO DO ARREFECIMENTO POR EVAPORAÇÃO

Durante as misturas, teve-se o cuidado de executar os procedimentos da forma mais cuidada e semelhante possível de modo a garantir propriedades semelhantes em todos os provetes moldados na mesma amassadura ou em amassaduras diferentes.

Após pesados (no dia útil anterior à amassadura) os agregados foram colocados numa sala de temperatura regulada programada para 20°C . A pesagem do cimento, água e adjuvante é apenas realizada minutos antes de se iniciar a mistura.

Para uma realização correta do enchimento dos moldes, criaram-se bases de suporte onde estes foram fixados (Figura 12). Para cada mistura foi construída mais do que uma base, sendo que cada uma foi direccionada para o ambiente a que se destina a medição. O intuito da utilização destes suportes prende-se ao facto de ser necessário manter a estabilidade (moldes mantidos na vertical) aquando da vibração do betão. Sendo a vibração efetuada numa mesa vibradora, os moldes devem estar bem fixos à base. A fixação foi efetuada com o auxílio de cantoneiras aparafusadas em torno dos tubos de PVC e preenchimento dos contornos com silicone. Além da fixação à base, os moldes foram fixos entre eles com tiras de fita adesiva.

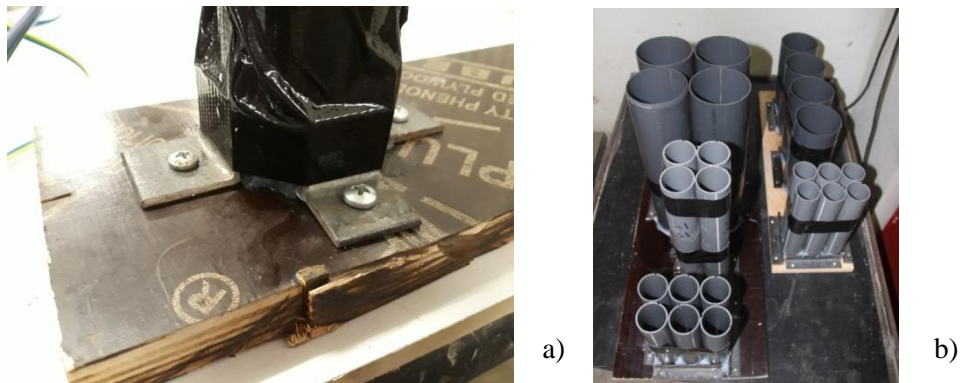


Figura 12 - Preparação dos moldes para betonar. a) Fixação à base; b) bases montadas na mesa vibratória.

Além de uma boa fixação, foi necessário pensar antecipadamente na desmoldagem. Para facilitar a mesma, foram realizados dois pré-cortes longitudinais em todos os moldes (Figura 13), salvo os moldes sujeitos à introdução de sensores, que seguiram uma linha de montagem diferente que será explicada no subcapítulo 3.4. Em adição, foi ainda aplicado óleo descofrante no interior dos tubos.



Figura 13 - Pré cortes efetuados nos tubos de PVC.

3.2.3 CUIDADOS NA AMASSADURA E DURANTE A BETONAGEM

Para o fabrico do betão, foi utilizada uma misturadora de eixo vertical com capacidade de 40l, que foi previamente humedecida antes da colocação dos componentes. Feito isto, colocaram-se os agregados por ordem decrescente de grandeza, acompanhados com cerca de metade da água. Misturou-se durante 30 segundos. Seguiu-se um período de repouso de 2 minutos para absorção de água pela superfície dos agregados. Adicionou-se o cimento (numa cavidade ao centro do volume de agregados), reiniciou-se o movimento da misturadora e adicionou-se a restante água. Após 1 minuto de mistura, colocou-se

lentamente o superplastificante, espalhando-o de modo uniforme pela mistura. Seguiu-se mais um minuto de mistura.

O enchimento dos moldes de maior dimensão foi efetuado com uma pá enquanto os de menor diâmetro, que requerem cuidados acrescidos, foram betonados com o auxílio de uma colher. Os tubos de 65 cm de comprimento foram preenchidos em quatro camadas intercalando a colocação de betão com vibração da mesa. Para os tubos de 25 cm de comprimento foram usadas duas camadas.

3.2.4 PROCEDIMENTOS IMEDIATAMENTE APÓS A BETONAGEM

Para todos os provetes, garantiu-se isolamento total até remoção do molde para desmoldagem. Para tal, todos os topos foram vedados com película aderente, com o cuidado de não permitir bolhas de ar sob a película (Figura 14).



Figura 14 - Moldes acabados de betonar e isolados com película aderente.

Em seguida, os provetes foram colocados nas respetivas câmaras climáticas, onde permaneceram intactos até às correspondentes desmoldagens.

3.2.5 DESMOLDAGEM E MEDIÇÕES

A desmoldagem teve como principal condicionante a não interferência nas condições dos provetes. O manuseamento dos provetes, aberturas das portas das câmaras climáticas, aplicação de utensílios em auxílio da desmoldagem, etc., são inevitáveis, no entanto os trabalhos foram planeados para minimizar os seus efeitos. Para tal, as aberturas das câmaras foram reduzidas às indispensáveis para retirar e colocar os provetes, a desmoldagem foi cuidadosa para que a superfície dos provetes não aquecesse e os provetes desmoldados foram colocados nos respetivos lugares, sempre garantindo a livre circulação de ar entre eles.

3.3 MEDIÇÕES DE MASSA

Esta propriedade foi avaliada em provetes de 25cm de comprimento e diâmetros de 47mm e 104mm. Nos primeiros, efetuaram-se medições ao dia 3 (D3) e dia 7 (D7) após a betonagem (correspondendo sempre o início da medição ao instante imediatamente a seguir à desmoldagem). Nos provetes de diâmetro de 104mm apenas se efetuaram pesagens após desmoldagem no dia 7.

Para os provetes de maiores dimensões foi utilizada uma balança de 36 kg de capacidade e resolução de uma décima de grama. Para os provetes de 47 mm a balança utilizada tem capacidade de 4 kg e resolução de uma centésima de grama (Figura 15).

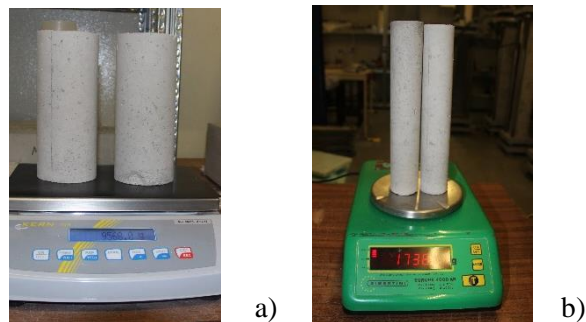


Figura 15 - Pesagens de provetes. a) Provetes de 104mm de diâmetro; b) provetes de 47mm de diâmetro.

Os intervalos de medições foram distribuídos aproximadamente do seguinte modo:

- Primeiras duas horas: pesagens de 15 em 15 minutos;
- Duas até quatro horas: pesagens de meia em meia hora;
- Quatro a dez horas: pesagens de hora a hora;
- Nova pesagem às 24 horas.

Desta forma pretendia-se obter dados suficientes para caracterizar a evolução da perda de massa ao longo do tempo.

3.4 MEDIÇÕES DE TEMPERATURA

Até alcançar a montagem utilizada, foi necessário efetuar diversos testes, com diferentes tipos de sensores e diferentes montagens. O modelo selecionado foi o que registou resultados mais fidedignos, com a mínima intrusão e melhor garantia do funcionamento do sensor no interior do betão fresco e endurecido.

Neste caso, o material utilizado na produção do sensor denomina-se como platina e a sua resistência aos 0°C é de 100 Ω , adquirindo assim a designação de Pt100. Neste tipo de transdutores, a relação entre a temperatura e a resistência elétrica pode ser dada pela Equação (3.1).

$$R_t = R_0 (1 + \alpha T) \quad (3.1)$$

onde,

R_t : Resistência elétrica exibida pelo transdutor (Ω);

R_0 : Resistência nominal a 0°C (Ω);

α : Coeficiente de temperatura da resistência ($\alpha = 0,00385^\circ\text{C}^{-1}$);

T : Temperatura (°C).

Os sensores utilizados pertencem à classe B da norma IEC 60751 (2008).

Para minimizar a influência da temperatura nos fios de ligação (Sousa, 2017), foi utilizada uma ligação a 3 fios no caso dos sensores sem encapsulamento metálico, e uma ligação a 4 fios no caso com esse encapsulamento.

O modelo que ofereceu maior confiança foi a utilização de um detetor resistivo de temperatura, do tipo PT100, fixo a um varão com 4cm de comprimento e 1,5mm de diâmetro e revestido com cola. Antes da colocação da cola, todo o conjunto foi devidamente isolado com um verniz isolante elétrico adequado para ambientes húmidos. Para fixação do sistema de medição ao molde, foram utilizados dois fios de nylon, amarrados às duas extremidades do varão e fixos com supercola, tanto no varão como no molde. Para não escorregamento do fio, efetuaram-se pequenas aberturas no local onde se pretendia a sua fixação. Em cada provete foram instalados dois sensores, um no centro do molde (apresentado posteriormente com a notação “int” no final do nome do sensor) e o outro com o seu centro a 5 mm da superfície do mesmo (assinalado com “ext” como terminação). Ambos foram instalados aproximadamente a meia altura do provete, garantindo apenas alguma distância entre eles para eliminação de interferências. A Figura 16 representa o esquema de montagem utilizado.

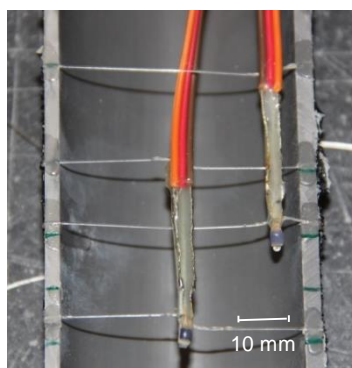


Figura 16 - Montagem inicial de sensores de temperatura.

Como seria de esperar num projeto de investigação com procedimentos experimentais, nem todos os ensaios decorrem como planeado desde o início. Assim sendo, alguns resultados foram considerados inválidos e surgiu a necessidade de repetição de medições. Na segunda fase (ensaios não previstos desde o início do programa) utilizaram-se sensores de temperatura do mesmo tipo, mas previamente encapsulados, em fábrica, num tubo de aço inox. Para melhor controlo de temperaturas superficiais, nos ensaios finais utilizaram-se três sensores nos provetes de maior diâmetro, dois exteriores e um interior (Figura 17).

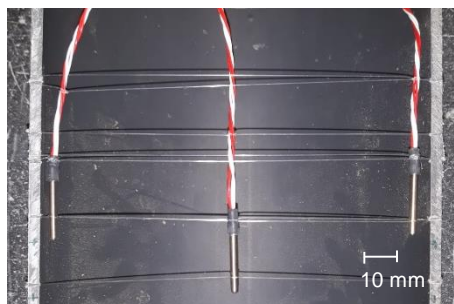


Figura 17 - Montagem final de sensores em moldes de 151mm.

O registo de temperaturas iniciou-se logo após a betonagem através do equipamento Data Taker DT80G. A aquisição de dados não foi interrompida até aos 8 dias de idade do betão e o sistema registou medições espaçadas de 30 segundos. Este registo inicial foi fundamental para detetar eventuais anomalias nos sensores de temperatura.

Relativamente ao esquema de ensaios, na combinação das duas fases de medições recolheram-se resultados válidos para os provetes de 47mm e 104mm e 151mm nos dias 3 e 7 após a betonagem, em ambos os ambientes controlados. Os resultados obtidos e respetivas análises serão apresentados no capítulo quatro.

3.5 MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÕES LONGITUDINAIS

A variação da deformação longitudinal dos provetes, após a desmoldagem, será essencialmente devida à retração por secagem e à extensão de origem térmica (arrefecimento por evaporação). Para analisar este efeito, instrumentaram-se provetes com transdutores indutivos do tipo LVDT (linear variable differential transformer). Os sensores utilizados apresentam uma gama de medição de 5 mm (limite bastante superior à ordem de grandeza dos deslocamentos previstos) e uma resolução do sistema de medição de 0,001 mm que se considerou suficiente para a análise pretendida.

Para garantir que o deslocamento ocorre unicamente numa das extremidades do provete e que as medições são axiais, foram montados suportes quase verticais para colocar os provetes. Desta forma, o peso próprio do provete garante que o encurtamento se dá apenas na superfície superior, ou seja, na superfície livre do elemento de betão. O LVDT é então colocado alinhado com o eixo de revolução do provete, perpendicular à sua secção, e em contacto com a base superior do cilindro. Na base inferior, há apenas um ponto de contacto a fixar o provete, para permitir a livre circulação de ar em toda a superfície de betão. Os suportes utilizados foram adaptados a partir de suportes em aço já existentes no laboratório (Figura 18).

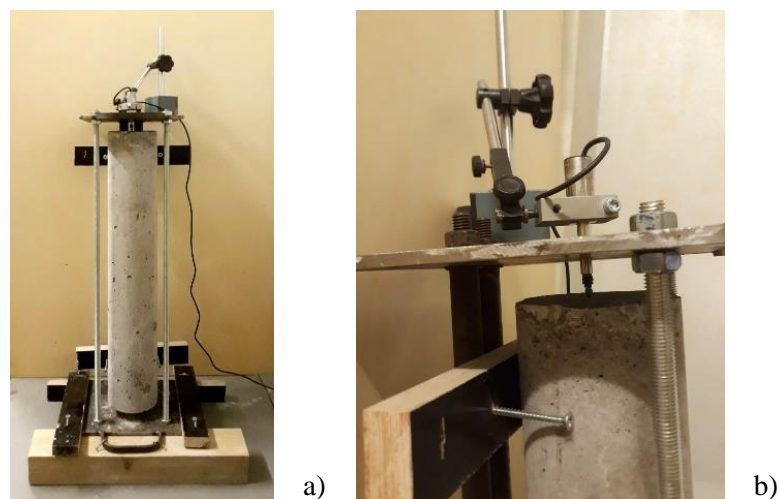


Figura 18 – Sistema de medição de comprimentos. a) Suporte adaptado; b) Modo de colocação do LVDT utilizado.

Para estabilizar termicamente os suportes, estes foram colocados com antecedência mínima de 24 horas no ambiente a serem utilizados. Caso contrário, a adaptação das barras de suporte ao ambiente poderia implicar variações de comprimento significativas e interferir nas medições. Os suportes foram mantidos desencostados de paredes, para minimizar interferências de vibrações associadas à operação das câmaras climáticas.

Os provetes ensaiados corresponderam aos diâmetros de 47mm e 104mm. Obtiveram-se resultados válidos para um provete de cada diâmetro, para desmoldagem aos dias 3 e 7 após betonagem, e para cada ambiente.

4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Para a apresentação e interpretação dos resultados expostos neste capítulo, recordam-se e acrescentam-se as seguintes considerações:

- O ambiente 1 corresponde a um ambiente mais agressivo, programado para uma temperatura de 35°C e com humidade relativa variável entre 45±5%.
- O ambiente 2 simula um ambiente frequente em Portugal, com uma temperatura de 20°C e 50% de humidade.
- Relativamente às medições de temperatura, quando se refere “int” ou “ext” na denominação de cada sensor, o nome corresponde ao sensor central e ao sensor superficial (a 5mm da superfície), respetivamente.
- Sempre que existe mais do que uma medição em condições semelhantes (ver Quadro 5), é apresentada a média dos valores medidos. Os dados adquiridos automaticamente foram tratados de forma a obter um intervalo de tempo entre medições igual a 1 minuto e 30 segundos, que se revelou suficiente para a caracterização dos fenómenos em estudo.

As deformações longitudinais foram adquiridas de 10 em 10 segundos. Assim, para obter resultados com um período de 1 minuto e 30 segundos, é feita uma média dos 9 valores adquiridos nesse intervalo de tempo, centrada no instante de tempo para o qual se pretende obter o resultado.

As medições de temperatura, cujos registos se iniciaram espaçados de 30 segundos, foram convertidas numa média móvel de 3 medições (correspondentes ao instante a apresentar o resultado, ao instante anterior e seguinte). Assim, todos os dados de comprimento e temperatura, sofreram uma diminuição de ruído e resultaram em valores igualmente espaçados de um minuto e meio.

4.1 AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA

No que diz respeito às variações de massa, os resultados obtidos estão apresentados nos Gráficos 1 a 4, representando o eixo horizontal uma escala temporal (em horas) e o eixo vertical a perda de massa, dada em percentagem da massa inicial registada no provete.

O trecho contínuo apresenta as medições efetuadas durante o dia da desmoldagem, nas condições e intervalos referidos no Capítulo 3. Após as dez horas de medições, foram interrompidas as leituras, que apenas foram retomadas na manhã do dia seguinte (trecho a tracejado). Este último trecho foi resultado de uma regressão polinomial de terceiro grau tendo por base as duas últimas medições do dia da desmoldagem e duas medições no dia posterior à desmoldagem.

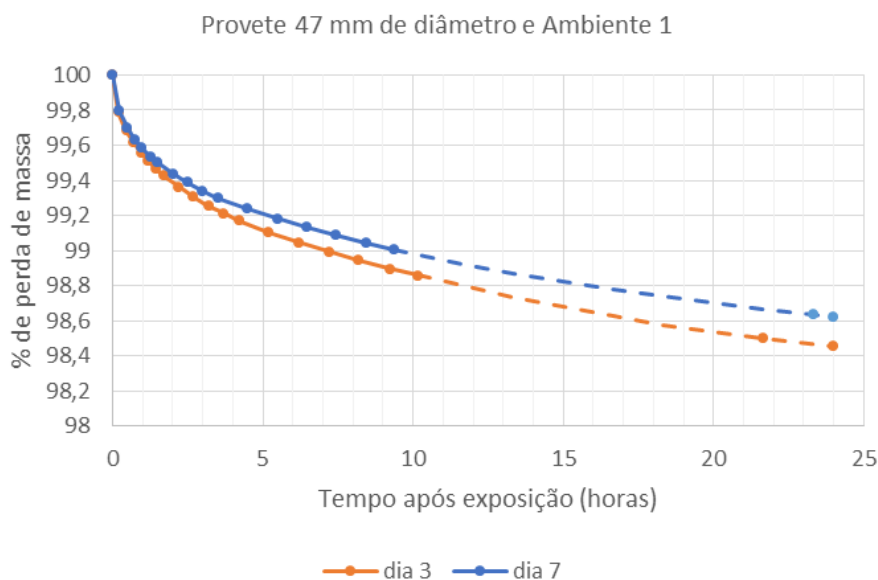


Gráfico 1 -Perda de massa dos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem aos dias 3 e 7.

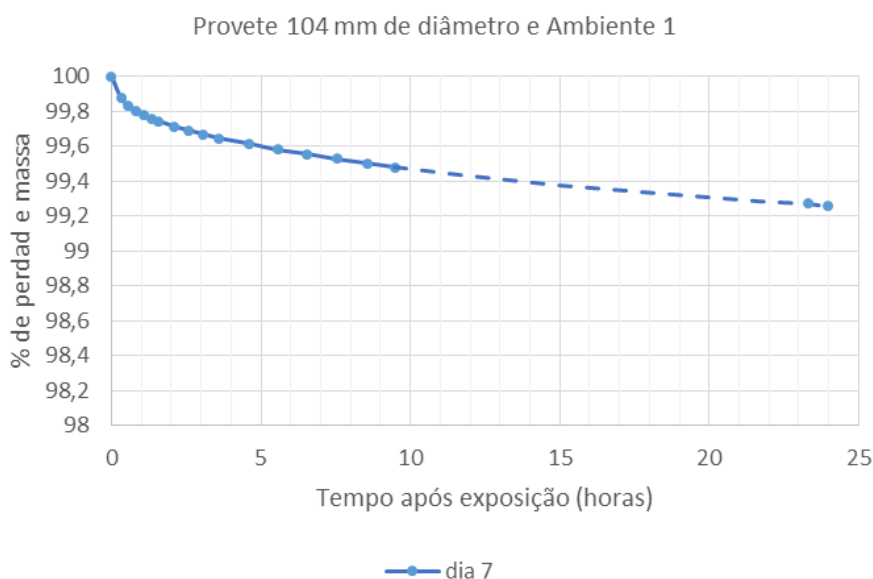


Gráfico 2 -Perda de massa dos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao dia 7.

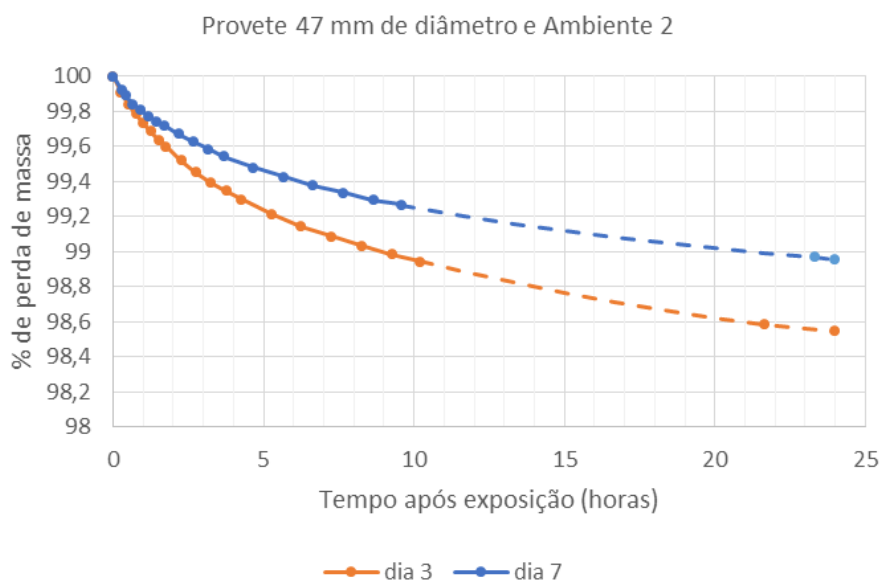


Gráfico 3 -Perda de massa dos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem aos dias 3 e 7.

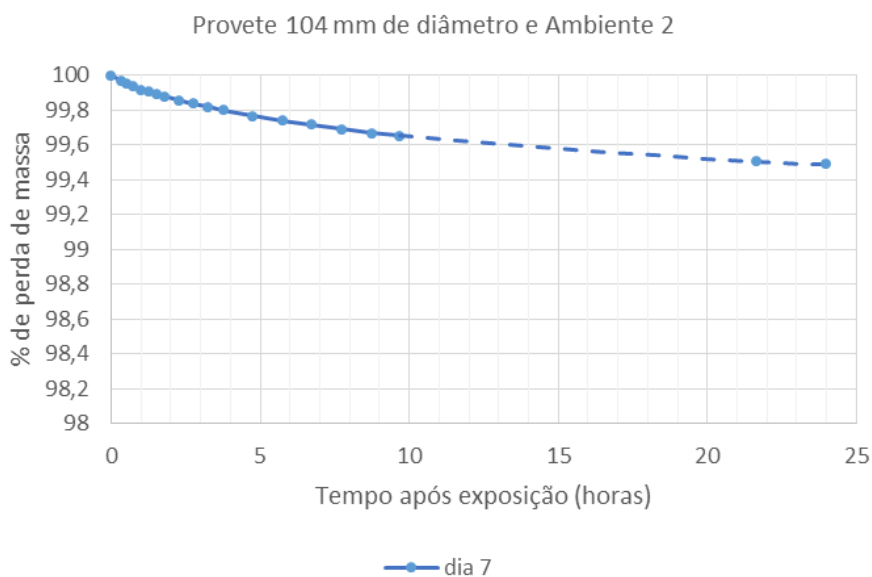


Gráfico 4 -Perda de massa dos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao dia 7.

Da análise dos Gráficos 1 a 4 retiram-se as seguintes conclusões:

- Para o mesmo ambiente, em todos os casos, o aumento da idade de exposição proporciona um decréscimo mais suave na perda de massa. Isto pode ser explicado pelo facto de a rede porosa ficar mais fechada à medida que a idade da peça aumenta, o que provoca uma diminuição na intensidade de evaporação. Note-se que a água à superfície em contacto com a cofragem não seca também é menor.

- Para cada ambiente e para cada dia de exposição, a perda percentual de massa é superior nos provetes de 47 mm de diâmetro relativamente aos provetes de 104 mm. O facto de a evaporação ser mais notável nos provetes de menor diâmetro justifica-se pela maior facilidade de libertação de água dos poros interiores. Deste modo, a secagem atinge mais rapidamente o interior da peça. Além disto, provetes com menor diâmetro representam superfícies específicas maiores e portanto, maior exposição à secagem
- Para o mesmo tipo de provete, quando exposto ao ambiente 1, a perda é mais intensa do que quando exposto ao ambiente 2.

4.2 EVAPORAÇÃO A PARTIR DE UMA SUPERFÍCIE

Pretendeu-se explorar experimentalmente o modo como se dá a evaporação de água nos ambientes simulados. Para tal, recorreu-se a um recipiente de secção circular constante que foi pesado diversas vezes para monitorização da massa evaporada por unidade de superfície. O recipiente foi preenchido com água e colocado no ambiente a analisar. Após a temperatura da água e do recipiente estabilizarem efetuaram-se pesagens durante algumas horas, as quais resultaram na perda de massa representada no Gráfico 5. Para ambos os casos foi utilizado um recipiente de 17 cm de diâmetro interior na zona do nível de água, o que equivale a uma superfície livre de $0,022697 \text{ m}^2$.

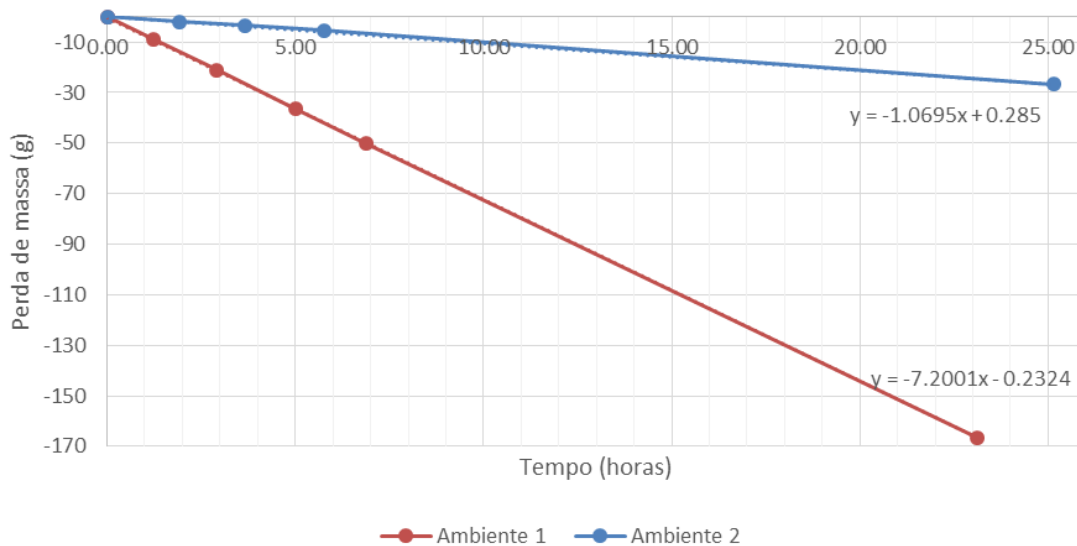


Gráfico 5 - Perda de massa de água por evaporação nos dois ambientes simulados experimentalmente.

Como seria previsível, ao ambiente 1, bastante mais quente do que o ambiente 2, correspondem perdas mais acentuadas.

O objetivo da determinação experimental apresentada no Gráfico 5 assenta na necessidade de estimar o parâmetro E_w (taxa de evaporação de uma superfície livre de água) para cada ambiente de exposição envolvido no programa. Através de um ajuste linear, obteve-se um declive para o ambiente 1 e ambiente 2 com os valores de $7,2001 \text{ g/h}$ e $1,0695 \text{ g/h}$, respetivamente. Dividindo este declive pela área da superfície livre de água, obtém-se o parâmetro E_w . Sendo a evolução de perda de massa constante, este valor será também contante, variando apenas de ambiente para ambiente e não ao longo do tempo. Daqui resultam taxas de evaporação da superfície livre de água de $0,3172 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ para o ambiente 1 e $0,0471 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ para o ambiente 2. Como seria de esperar, resulta um valor superior para o ambiente 1 uma vez

que a velocidade de evaporação aumenta com a temperatura e diminui com a humidade. Posto isto, comprova-se que o ambiente 1 é o ambiente que proporciona um maior potencial de evaporação.

Para obtenção do parâmetro E_c (taxa de evaporação de uma superfície de betão), o procedimento de cálculo é semelhante ao efetuado para a taxa de evaporação de uma superfície livre de água. No entanto, neste caso, as variações de massa processam-se com velocidade variável ao longo do tempo, ou seja, não assumem uma forma linear (ver resultados de perda de massa no subcapítulo 4.1). Assim sendo, a taxa de evaporação da superfície de betão será também variável ao longo do tempo.

A Figura 19 (evoluções de massa apenas ilustrativas a título de exemplo) representa o modo de cálculo assumido para determinação da evolução de E_c .

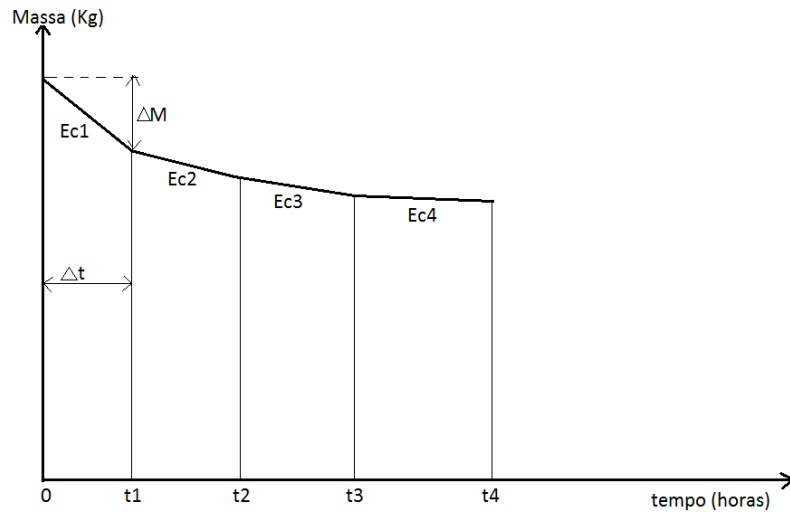


Figura 19 - Metodologia assumida no cálculo da taxa de evaporação numa superfície de betão.

A cada intervalo de tempo entre medições de massa está associada uma taxa de evaporação diferente. Os valores de E_c foram calculados para cada instante de tempo t_i como a média entre o valor determinado para o intervalo de tempo $[t_{i-1}; t_i]$ e o valor para o intervalo de tempo $[t_i; t_{i+1}]$. Para cada intervalo de tempo, esse valor é dado pela Equação (4.1). No instante inicial e final, não existindo simultaneamente dados anteriores e posteriores para efetuar uma média, assume-se, respetivamente, a primeira e última taxas calculadas para os intervalos de medição.

$$E_c = \frac{\Delta M}{\Delta t \cdot A_{sup}} \quad (4.1)$$

onde,

ΔM : variação de massa (kg);

Δt : intervalo de tempo (horas);

A_{sup} : área de superfície exposta a evaporação (m^2).

A área de superfície exposta a evaporação, A_{sup} , inclui a superfície lateral e um dos topos, dado que foi permitida a livre circulação de ar em toda a envoltória dos provetes exceto na base, que se encontrava em contacto com a superfície de suporte do elemento.

Feito este tratamento para cada ambiente, resultaram os Gráficos 6 e 7.

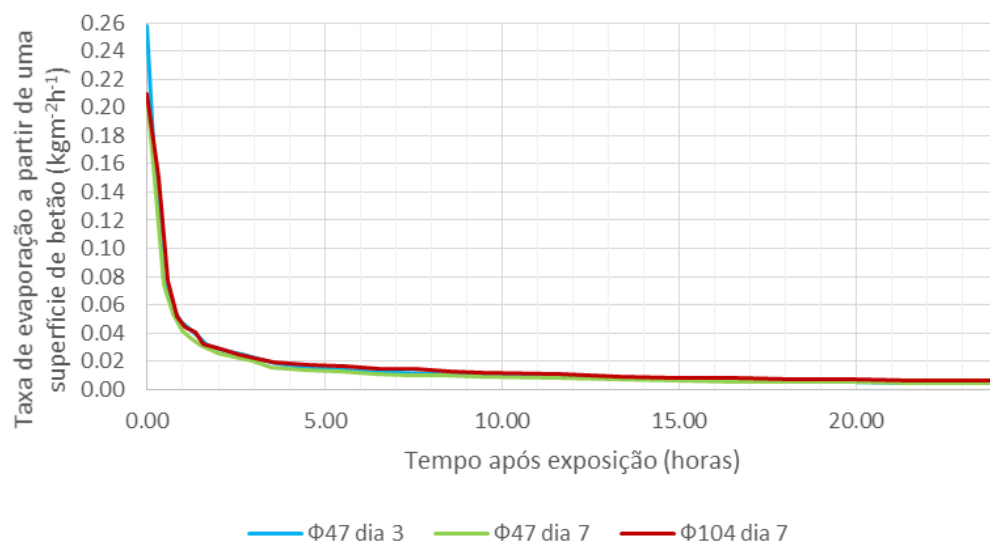


Gráfico 6 -Taxa de evaporação de uma superfície de betão inserida no ambiente 1.

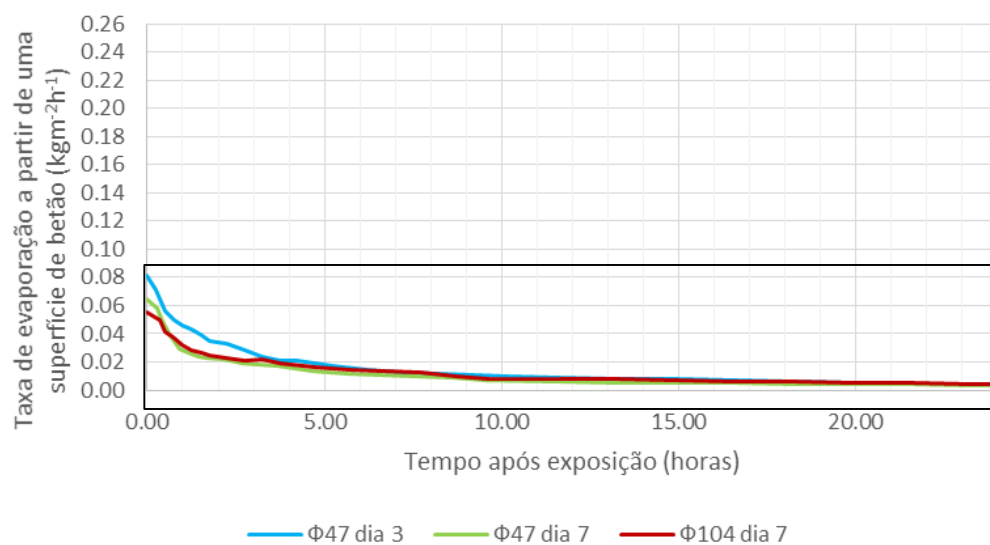


Gráfico 7 - Taxa de evaporação de uma superfície de betão inserida no ambiente 2.

Da análise dos Gráficos 6 e 7 é possível retirar as seguintes ilações:

- O valor de E_c decresce com o tempo. Nas primeiras horas a evaporação é muito mais rápida do que nas seguintes, diminuindo cada vez mais a taxa ao longo do tempo.
- No ambiente 1 (que parte de um valor superior) dá-se uma descida muito mais acentuada do que no ambiente 2, essencialmente nas primeiras horas. Os resultados estabilizam em ambos os ambientes, assemelhando-se o seu comportamento, aproximadamente a partir das 3 horas após a exposição.
- As medições efetuadas no ambiente 1 apresentam evoluções muito semelhantes entre si, tendo sido, portanto, efetuada uma média destes valores para os cálculos apresentados nos Gráficos 8 a 10.
- No ambiente 2, notam-se algumas diferenças, não negligenciáveis, entre os valores medidos para o terceiro e sétimo dia de exposição.

Com base nas conclusões supracitadas, para os diferentes ambientes, optou-se por efetuar uma média entre os valores que se consideraram próximos e com evoluções semelhantes (Gráfico 8). Daqui, resulta a distinção entre ambiente 1, ambiente 2 para o terceiro dia de exposição e ambiente 2 para o sétimo dia de exposição. Não se efetuou uma separação devida às dimensões dos provetes uma vez que se considerou que esse efeito tem muito pouca influência nas taxas de evaporação.

Feita a análise por ambiente e simplificação para valores médios, optou-se ainda por retratar a evolução do rácio entre a taxa de evaporação de uma superfície de betão e de uma superfície livre de água inserida nas mesmas condições envolventes (Gráfico 9).

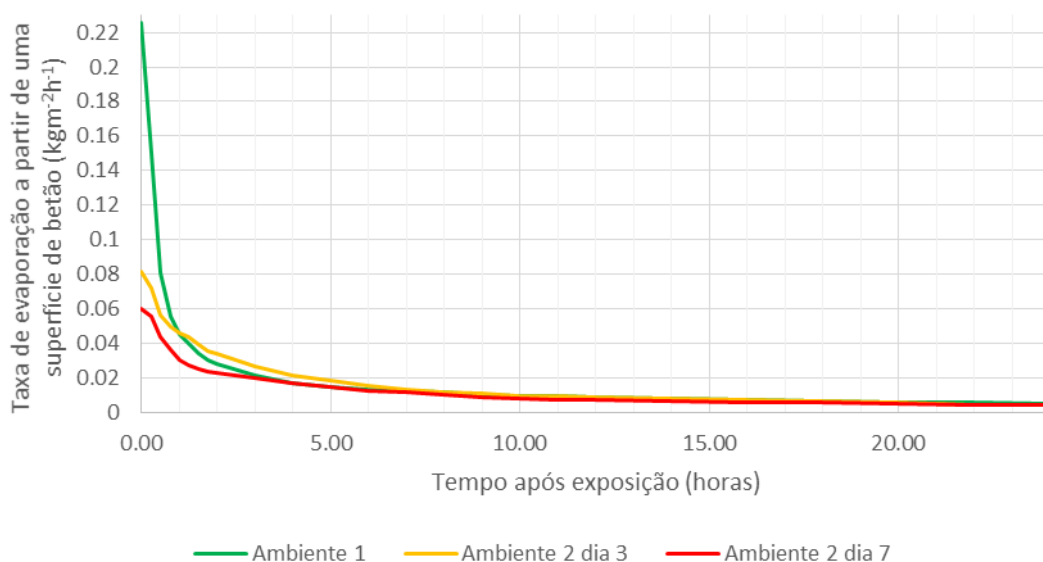


Gráfico 8 - Médias das taxas de evaporação numa superfície de betão.

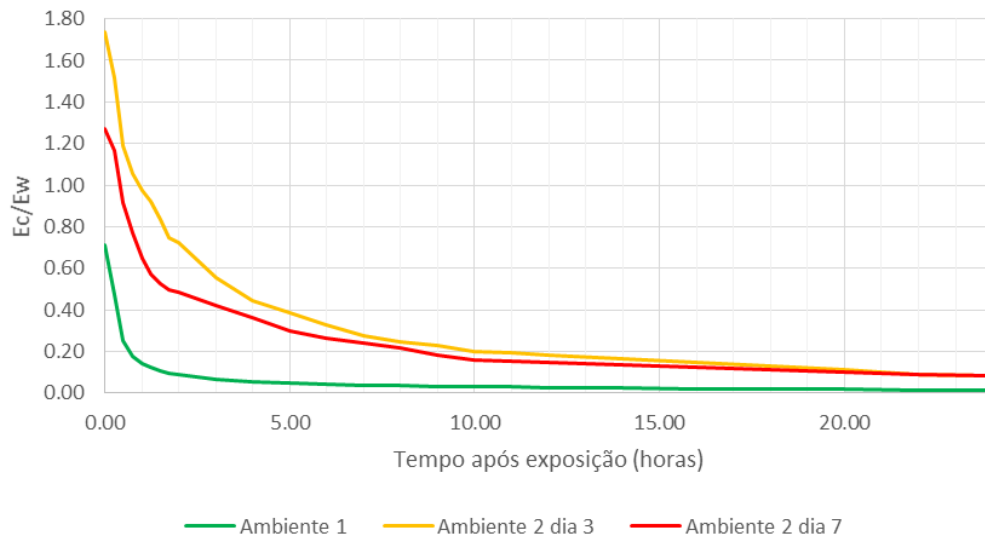


Gráfico 9 -Desenvolvimento E_c/E_w com base em resultados obtidos experimentalmente.

Pela análise do Gráfico 9 nota-se que a taxa de evaporação de uma superfície de betão sofre um forte decréscimo à medida que aumenta o tempo após a desmoldagem, afastando-se do valor da taxa de evaporação de uma superfície livre de água. O facto de o rácio, em alguns casos, partir de um valor superior a 1 (conforme foi medido no ambiente 2) pode estar relacionado com o facto de a área da superfície de betão a partir do qual se processa a evaporação, tendo em consideração a rugosidade macro e microscópica ser superior à superfície de um cilindro teoricamente liso (superfície considerada na determinação de E_c). A aglomeração de partículas, à superfície do provete de betão, a um nível microscópico, pode contribuir para este facto. No entanto, a explicação da relação entre E_c e E_w está fora do âmbito desta dissertação.

Calculadas as taxas de evaporação da superfície de betão nos dois ambientes de exposição, a partir da Equação (2.13), é possível estimar a evolução do fluxo de calor expectável devido ao arrefecimento por evaporação, q_{evap} (Gráfico 10).

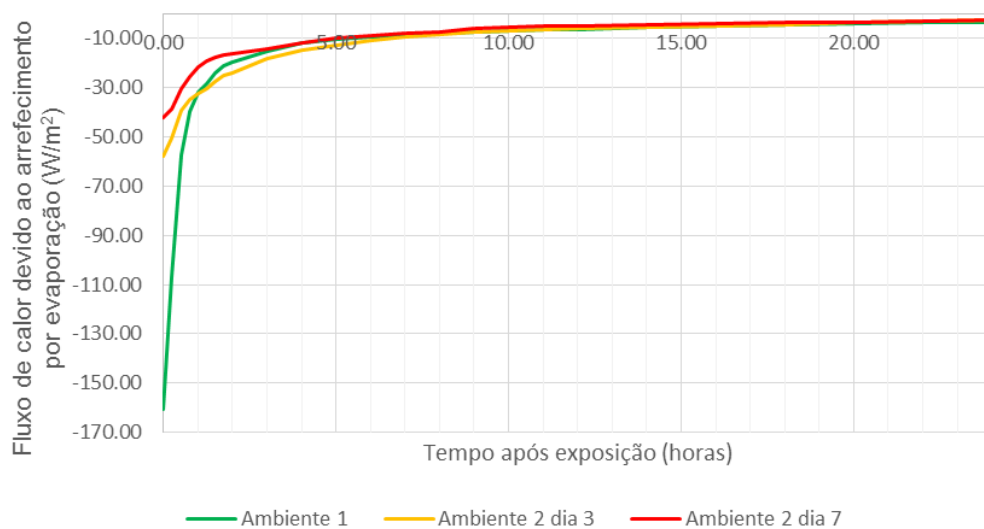


Gráfico 10 -Evolução do fluxo de calor devido ao arrefecimento por evaporação.

Pela interpretação do gráfico nota-se que o fluxo de calor sofre uma variação bastante superior no ambiente 1 e nas primeiras duas a três horas. Após este período, o parâmetro assume valores e comportamentos semelhantes para os dois ambientes.

4.3 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Todos os sensores iniciaram as suas leituras imediatamente após a moldagem. Estes registos foram úteis, não só para detetar anomalias no funcionamento do sistema de medição, mas também para registar as alterações no campo de temperaturas devidas ao processo de hidratação do cimento (Gráficos 11 e 12).

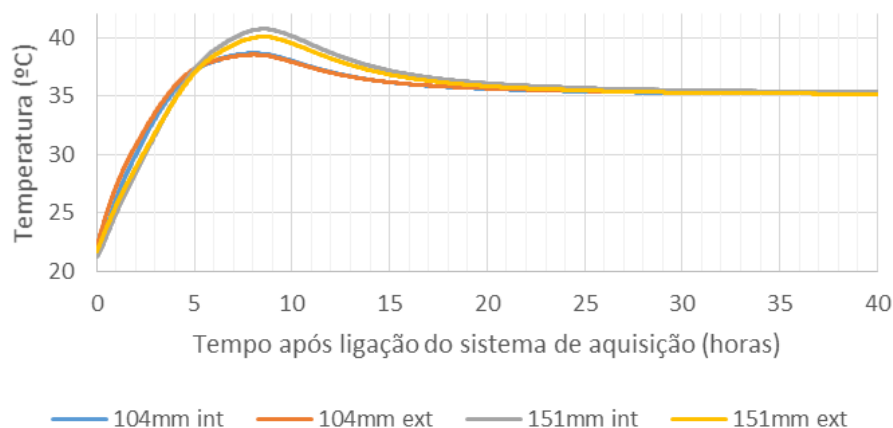


Gráfico 11 - Temperatura registada após betonagem dos provetes de 104mm e 151mm de diâmetro inseridos no ambiente 1.

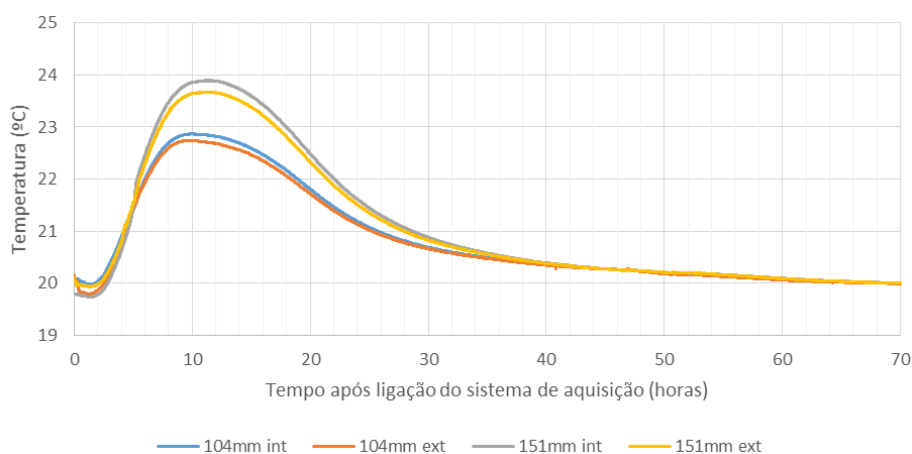


Gráfico 12 - Temperatura registada após betonagem dos provetes de 104mm e 151mm de diâmetro inseridos no ambiente 2.

Nos Gráficos 11 e 12 é possível observar a variação das temperaturas no betão após a moldagem, registadas em diferentes locais dos provetes, nomeadamente no núcleo (int) e a 5 mm da parede do molde (ext), tendo em conta os dois ambientes em estudo e conduzindo, em ambos os casos, a um equilíbrio com a temperatura existente na respetiva camara climática.

Em ambos os casos, verifica-se que a temperatura partiu de valores próximos de 20°C em todos os sensores (temperatura do local de betonagem próxima deste valor e agregados mantidos a 20°C antes da

amassadura). No ambiente 1 o equilíbrio térmico deu-se mais rapidamente do que no ambiente 2, sendo que, no primeiro, a estabilização ocorre aproximadamente às 28 horas, enquanto no segundo, demoraram cerca de 64 horas até estabilizarem novamente na temperatura ambiente.

Nota-se, claramente, que no provete de maiores dimensões, o aumento de temperatura devido à hidratação do cimento é superior. É ainda possível concluir que o aumento de temperatura no núcleo da peça é superior ao registado na superfície, acentuando-se esta diferença com o aumento da dimensão do provete (maior afastamento entre sensor interior e exterior).

No ambiente 2, o efeito do calor de hidratação assume valores na ordem dos 4°C nos provetes de 151 mm de diâmetro, enquanto os provetes de 104 mm de diâmetro registam aproximadamente 1°C abaixo. Já no ambiente 1, o aumento da temperatura por efeito do processo de hidratação do cimento não é tão facilmente identificado uma vez que além deste efeito, os provetes estão ainda a sofrer um aumento de temperatura adicional uma vez que partiram de aproximadamente 15°C abaixo da temperatura registada na câmara climática. No entanto, partindo dos 35°C (temperatura da câmara correspondente ao ambiente 1), verifica-se que a temperatura máxima atingida é de aproximadamente 41°C, o que implica um aumento de 6°C no núcleo do provete de 151 mm de diâmetro. No provete de diâmetro inferior regista-se um aumento de cerca de 4°C relativamente ao valor de 35°C.

Os Gráficos 13 a 18 apresentam a evolução da temperatura registada em cada sensor, tendo como ponto de partida a “hora zero do provete desmoldado”, ou seja, minuto correspondente ao término da desmoldagem do provete e início de exposição. Note-se que no momento da desmoldagem os provetes registam valores muito próximos da temperatura da câmara onde se inserem.

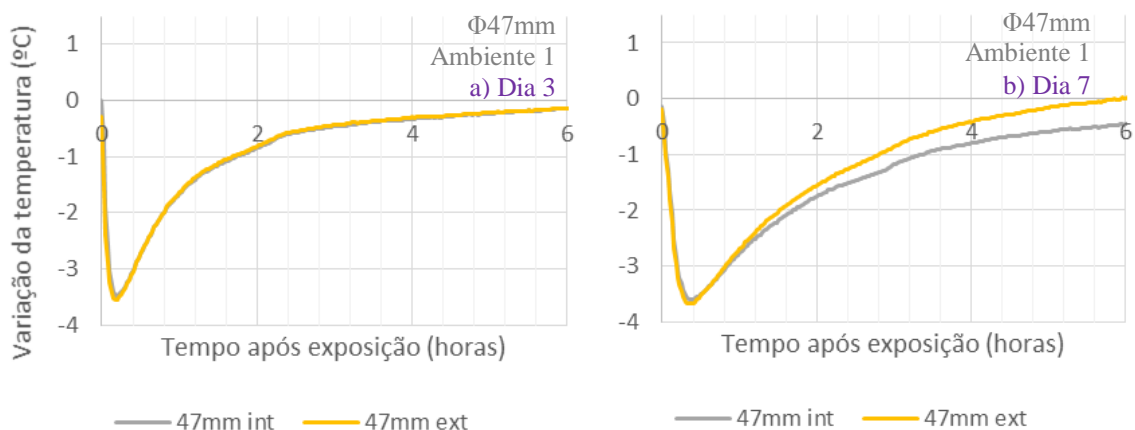


Gráfico 13 - Variação de temperaturas medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro no ambiente 1.
a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.

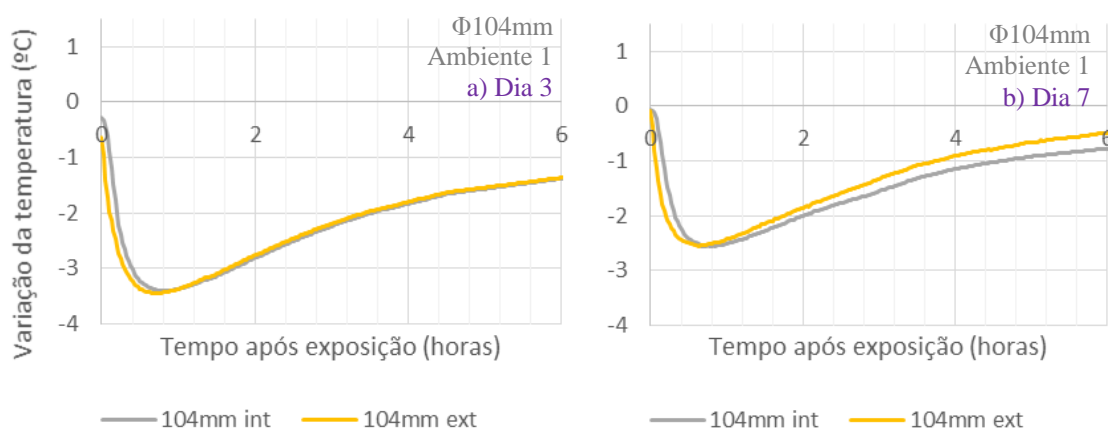


Gráfico 14 -Variação de temperaturas medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro no ambiente 1.
a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.

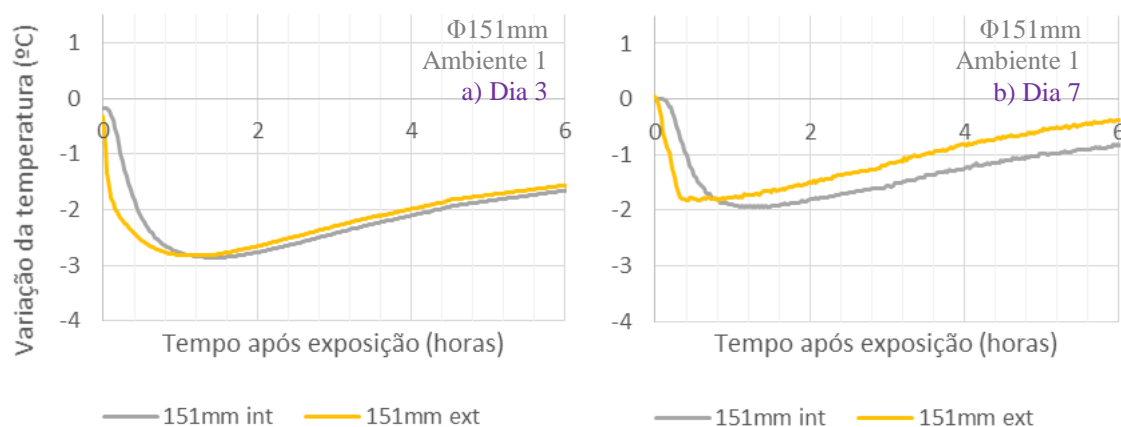


Gráfico 15 -Variação de temperaturas medidas nos provetes de 151 mm de diâmetro no ambiente 1.
a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.

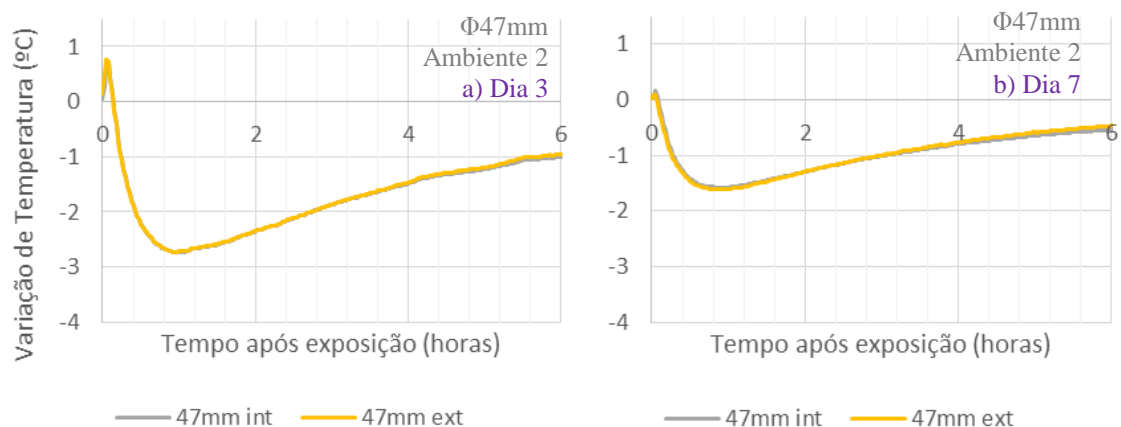


Gráfico 16 -Variação de temperaturas medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro no ambiente 2.
a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.

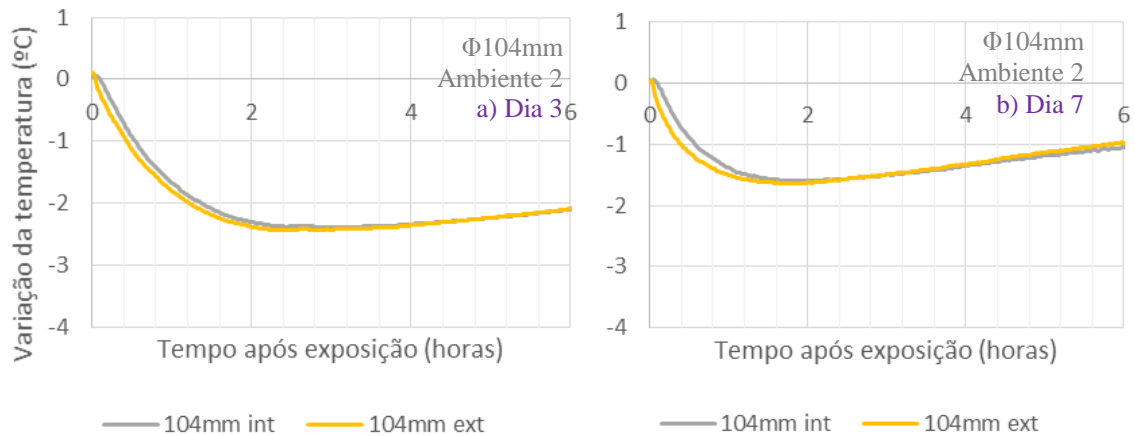


Gráfico 17 -Variação de temperaturas medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro no ambiente 2.
a) para exposição aos 3 dias de idade; b) para exposição aos 7 dias de idade.

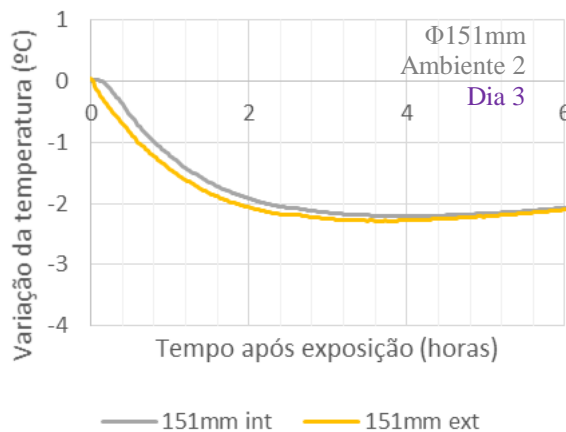


Gráfico 18 - Variação de temperaturas medidas nos provetes de 151 mm de diâmetro no ambiente 2, para exposição aos 3 dias de idade.

Dos Gráficos 13 a 18 é possível reter as seguintes deduções:

- Provetes de menores diâmetro correspondem a efeitos mais acentuados, isto é, atingem menores temperaturas e sofrem evoluções mais rápidas. O arrefecimento diminui com o aumento da dimensão do provete uma vez que a sua origem provém apenas do exterior. Estando o núcleo mais quente do que a superfície, origina-se uma propagação de calor a partir da zona de maior temperatura. Isto traduz-se numa inércia térmica no interior do provete que se reflete na diminuição dos efeitos do arrefecimento por evaporação. Partindo desta teoria, depara-se ainda que os provetes menores possuem uma capacidade de recuperação de temperatura muito mais eficaz.
- Os provetes sujeitos a uma exposição no ambiente 1 (ambiente com maior potencial de evaporação) sofrem variações de temperatura mais acentuadas, ou seja, decréscimos superiores e em intervalos de tempo menores. Tome-se por exemplo o provete de 47 mm de diâmetro, exposto ao dia 3 nos diferentes ambientes. No ambiente 1, a sua descida é de cerca de 3,5°C em 12 minutos enquanto no ambiente 2 apresenta apenas uma diminuição de temperatura de 2,7°C necessitando de cerca de 63 minutos para atingir este decréscimo.

- Efetuando uma análise tendo por base o dia de desmoldagem, é possível verificar que em todos os casos, independentemente do ambiente de exposição, as variações tornam-se mais ténues com o aumento do instante em que se retira o molde. Ainda de acordo com este modo de análise, verifica-se, apenas no ambiente 1, que as diferenças entre a desmoldagem no dia 3 ou dia 7 tornam-se mais notáveis com o aumento da dimensão do provete.
- Partindo das situações previamente expostas conclui-se que a combinação que resulta num arrefecimento mais rápido e com maior variação de temperatura acontece para o provete de menor diâmetro (47 mm), inserido no ambiente 1 e para desmoldagem aos três dias de idade. Neste caso, a queda verificada é de 3,5°C em 12 minutos.
- No que diz respeito à localização do sensor verifica-se que não existem grandes diferenciais entre a temperatura registada na superfície e no núcleo da peça. Esta diferença destaca-se no ambiente 1 mas o seu valor não varia muito para além de 1°C. A diferença superior, notada em alguns casos para uma desmoldagem ao dia 7, será devida à incerteza nas medições efetuadas com a primeira fase de montagem de sensores.
- Tomando enfoque no ambiente 1, numa fase inicial (aproximadamente durante a primeira meia hora) regista-se uma diminuição de temperatura superior no sensor superficial sendo que após este instante, o aumento de temperatura também é superior para este sensor, aproximando-se mais rapidamente da temperatura ambiente. Já no ambiente 2, esta situação não é tão facilmente perceptível, notando-se apenas que o sensor interior regista sempre temperaturas ligeiramente superiores ao sensor interior ao longo das primeiras horas após a exposição.
- Observando os primeiros minutos após a desmoldagem dos provetes inseridos no ambiente 2, é possível constatar um ligeiro aumento de temperatura, agravando-se nas peças de menor dimensão e essencialmente no sensor superficial. Este aumento deve-se à influência de fatores externos durante o momento da desmoldagem, como a aplicação de forças sobre o molde e utensílios de auxílio à desmoldagem e manobragem dos provetes. Este efeito apenas se verifica no ambiente 2 uma vez que no ambiente 1, estando a temperatura superficial da peça tão mais elevada (e mais próxima da temperatura corporal das mãos que manuseiam o provete), o seu aquecimento torna-se negligenciável.
- Note-se que os valores medidos, apresentados às 24 horas, já estão muito próximos do equilíbrio térmico com o meio envolvente. Os valores registados após este instante (até cerca de 70 horas) apenas sofrem alterações de cerca de 0,2°C, não atingindo completamente a temperatura prevista na câmara. No entanto, a temperatura instalada nas câmaras climáticas, apesar de ser razoavelmente estável, pode sofrer pequenas variações. Repare-se ainda que o valor medido no instante da desmoldagem (considerado em equilíbrio) também não parte exatamente do valor considerado no respetivo ambiente.

4.4 AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL

Os encurtamentos obtidos foram convertidos em extensões dividindo o deslocamento registado no LVDT pelo comprimento inicial do provete correspondente. Como mencionado no capítulo 2, as deformações locais associadas à retração por secagem, ou outro tipo de retração, não podem ser obtidas diretamente através de um processo experimental. As leituras registadas por parte dos instrumentos de medição correspondem a deformações totais que resultam dos efeitos sobrepostos da deformação de origem térmica, deformação autógena e deformação por efeito de secagem (equação (4.2)) Deste modo, para uma melhor análise do efeito da secagem, às deformações totais retirou-se o efeito da temperatura

assumindo que este resulta da equação apresentada em (4.3), e para um coeficiente de dilatação térmica do betão de $1 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Contudo, chama-se à atenção para as dimensões dos provetes utilizados nas medições de temperatura e deformações longitudinais, que possuem comprimentos diferentes. Apesar de o diâmetro ser semelhante, a altura varia em 400 mm. Isto seria insignificante se os provetes tivessem sido selados nos topos, dando-se a evaporação apenas pela superfície lateral, o que não aconteceu no programa experimental. Por conseguinte, é necessário ter em conta que, apesar de esta interferência não ser muito significativa (uma vez que os sensores de temperatura foram colocados aproximadamente a meia altura do molde), os dados de temperatura inseridos na Equação (4.3) não correspondem meticolosamente à temperatura média, em cada instante de tempo, nos provetes onde é realizada a medição da deformação. Note-se ainda que apesar de não ter sido separado o efeito da retração autógena, e mesmo esta assumindo valores inferiores à retração de secagem em betões de resistência normal, o seu efeito não é negligenciável.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{cs} + \varepsilon_{\Delta T} \quad (4.2)$$

onde,

ε_t : Deformação longitudinal total do provete;

ε_{cs} : Deformação resultante do efeito de retração;

$\varepsilon_{\Delta T}$: Deformação de origem térmica.

$$\varepsilon_{\Delta T} = \alpha \Delta T \quad (4.3)$$

onde,

α : Coeficiente de dilatação térmica de betão ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

ΔT : Variação de temperatura após desmoldagem ($^{\circ}\text{C}$).

A variação de temperatura inserida na equação corresponde a uma variação média ponderada entre os valores registados pelo sensor interior e exterior. Para atribuição de pesos a incluir na média ponderada, assumiu-se que os desvios entre as temperaturas interiores e registadas à superfície eram bastante reduzidos, tendo sido adotado, de forma simplificada, um peso de 50% para cada sensor.

Os Gráficos 19 a 26 representam os resultados obtidos após separação de efeitos. A linha contínua corresponde à deformação provocada pela secagem (ε_{cs}) enquanto as linhas a tracejado correspondem aos dados que lhe deram origem: deformação total obtida através dos deslocamentos registados pelo LVDT (ε_t) e deformação de origem térmica ($\varepsilon_{\Delta T}$).

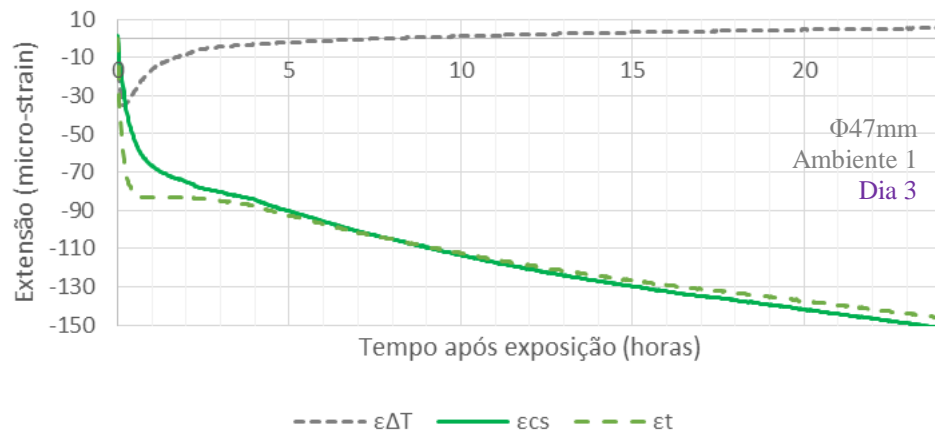


Gráfico 19 - Deformações medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao terceiro dia.

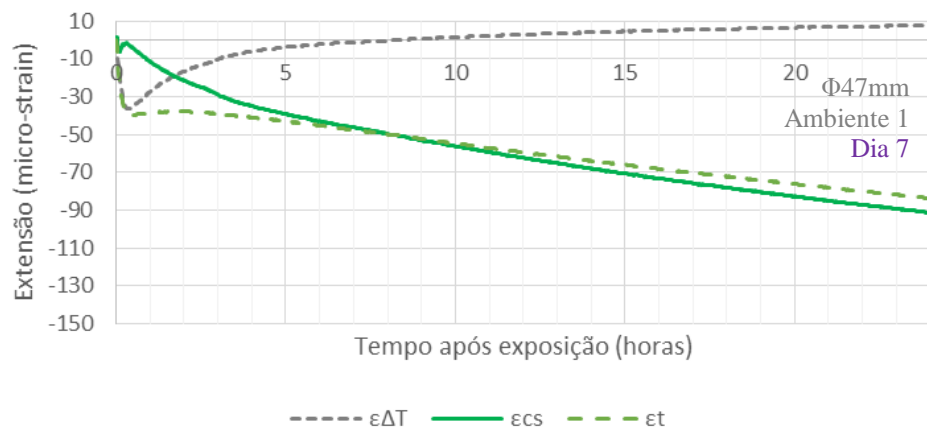


Gráfico 20 - Deformações medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao sétimo dia.

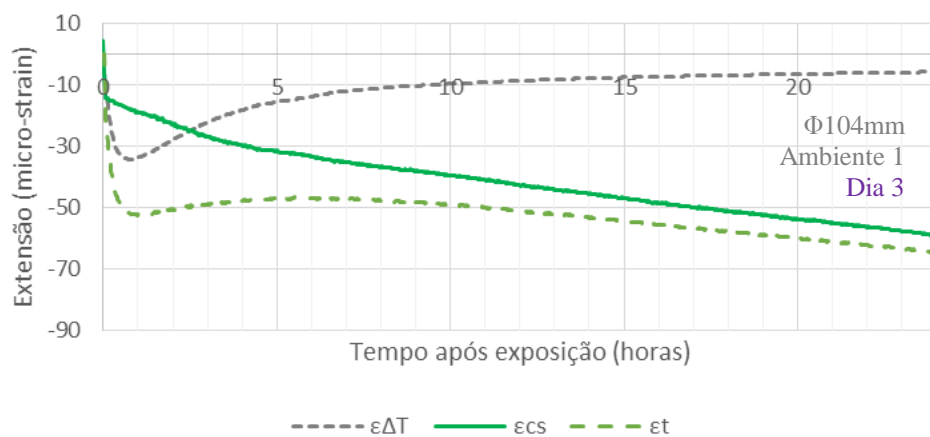


Gráfico 21 - Deformações medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao terceiro dia.

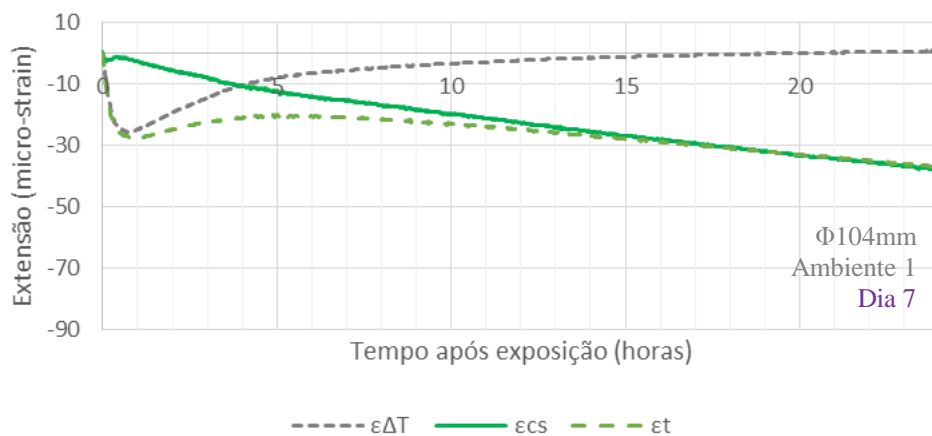


Gráfico 22 - Deformações medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 1, para desmoldagem ao sétimo dia.

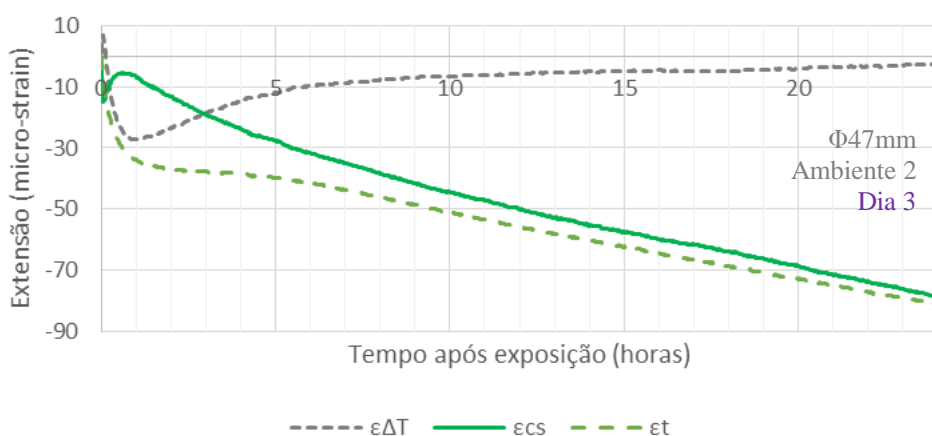


Gráfico 23- Deformações medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao terceiro dia.

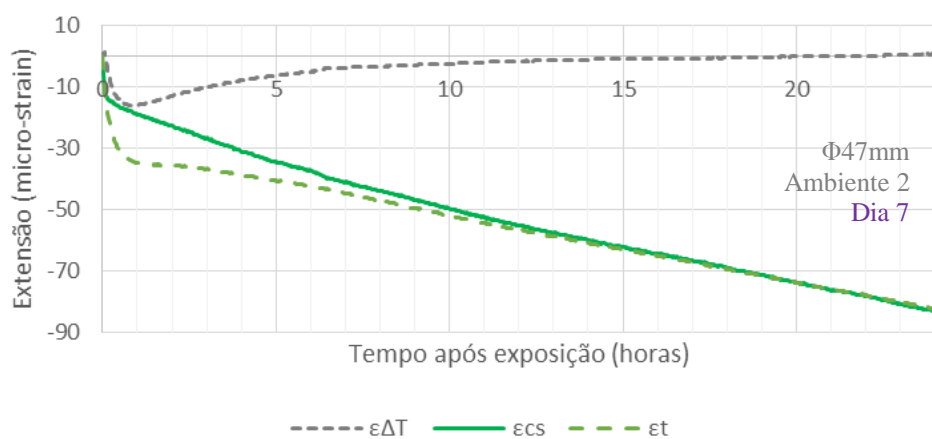


Gráfico 24- Deformações medidas nos provetes de 47 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao sétimo dia.

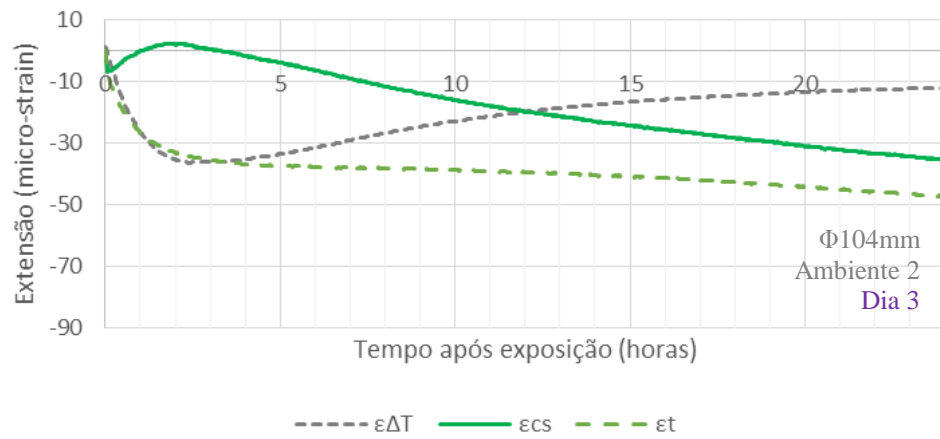


Gráfico 25- Deformações medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao terceiro dia.

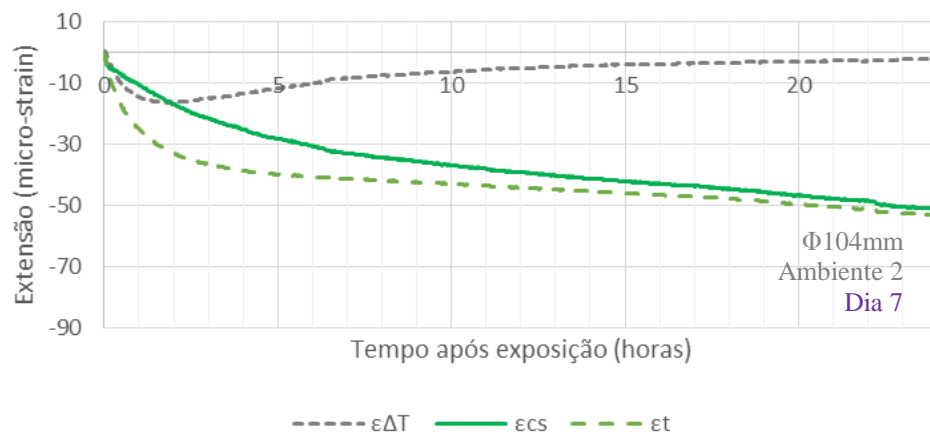


Gráfico 26- Deformações medidas nos provetes de 104 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem ao sétimo dia.

O gráfico 27 apresenta os resultados de deformações totais para todas as combinações envolvidas nas medições de deformação longitudinal. Visualmente é realçada a distinção entre os provetes de diferentes diâmetros: 47 mm representado com linhas contínuas e 104 mm representado a tracejado.

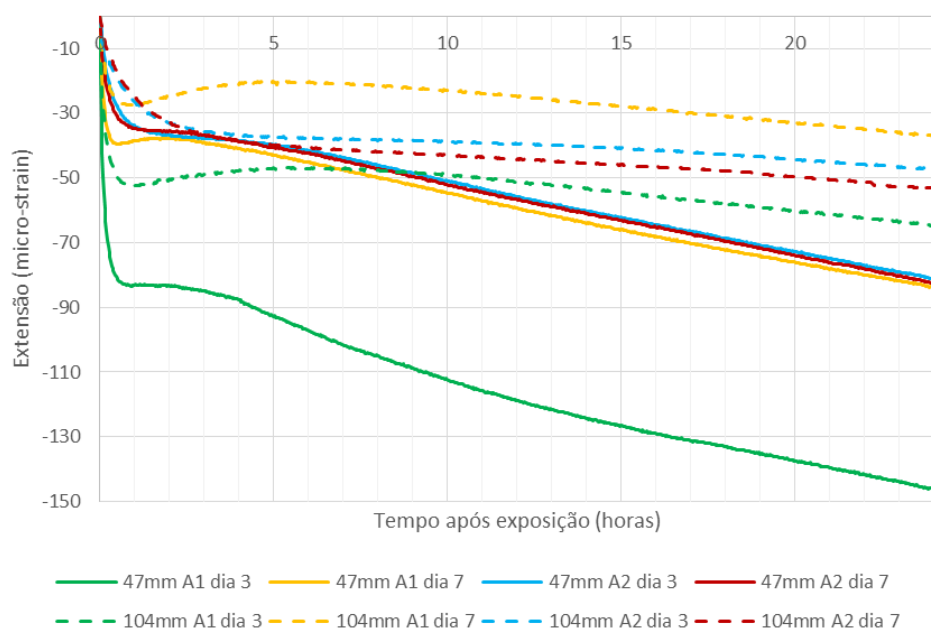


Gráfico 27 - Resultados de todas as deformações totais obtidas.

Para melhor interpretação e comparação de resultados, optou-se ainda por efetuar uma análise de extensões totais também por ambiente. Daqui resultaram os Gráficos 28 e 29.

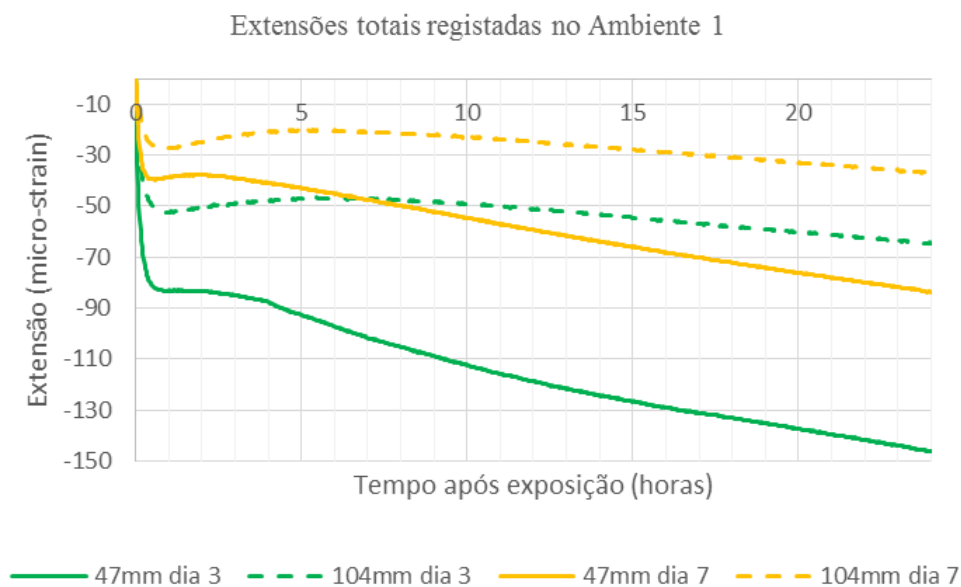


Gráfico 28- Extensões totais registadas no ambiente 1, nas 24 horas após exposição.

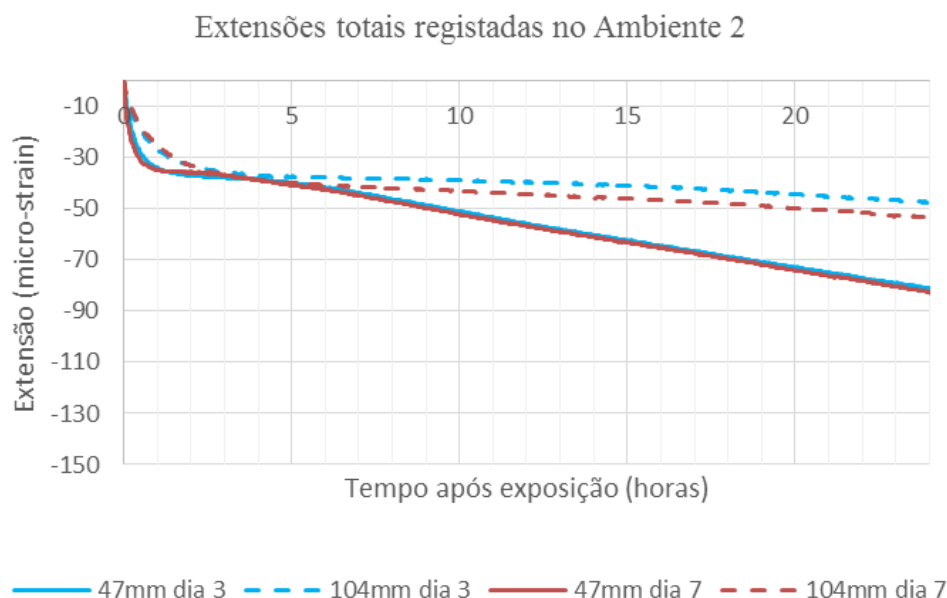


Gráfico 29- Extensões totais registadas no ambiente 2, nas 24 horas após exposição.

Note-se que para todas as regras há exceções, essencialmente quando as conclusões são generalizadas a partir de um número limitado de ensaios experimentais. Assim sendo, as constatações partem do que se considera mais lógico e explicável, e com resultados mais representativos.

Assim sendo, dos Gráficos 19 a 29 retiram-se as seguintes conclusões:

- Durante a primeira hora após a exposição, a deformação total assume uma evolução muito superior relativamente às restantes horas. Esta evolução é substancialmente acentuada no ambiente 1, o que indica novamente que os efeitos provocados pela secagem apresentam valores superiores para o ambiente de maior potencial de evaporação (ambiente 1).
- Analisando os valores após as primeiras horas, volta-se a aferir o exposto no tópico anterior: ambientes de maior temperatura e humidade inferior resultam em deformações superiores, excetuando-se um caso. No provete de 104 mm de diâmetro, no ambiente 2, para uma exposição aos 7 dias de idade, há um ligeiro aumento (cerca de 15 $\mu\epsilon$ às 24 horas) relativamente ao terceiro dia de exposição. Porém, ainda assim, conclui-se com as restantes combinações, um aumento de deformação com o aumento da temperatura. A diferença mais significativa para a situação exposta surge no provete de 47 mm de diâmetro desmoldado aos 3 dias de idade, em que entre o ambiente 1 e ambiente 2 apura-se uma diferença de cerca de 65 $\mu\epsilon$ às 24 horas.
- A provetes de menor diâmetro, com as restantes condicionantes idênticas, correspondem deformações totais e por secagem superiores. Esta constatação pode ser confirmada com todos os resultados apresentados nos gráficos.
- As deformações obtidas reduzem-se com o aumento da idade de desmoldagem. Quanto mais tarde se inicia a exposição, maior a maturidade do betão logo, menor a perda de água e consequente efeito da retração. Esta situação é clara no ambiente 1, resultando em diferenças entre 28 $\mu\epsilon$ (proвете de 104 mm de diâmetro) e 65 $\mu\epsilon$ (proвете de 47 mm de diâmetro) às 24 horas. Todavia, no ambiente 2, a diferença é muito reduzida, essencialmente nos provetes de menor diâmetro, o que leva a assumir que surge uma proximidade entre os valores respetivos à

desmoldagem aos 3 e 7 dias no ambiente 2. Nos provetes de 104 mm de diâmetro, o aumento do encurtamento (em $6 \mu\epsilon$) não seria expectável, o que pode ser consequência de incertezas na medição (foi utilizado um provete de 104 mm em cada idade).

4.4.1 COMPARAÇÃO DAS EXTENSÕES OBTIDAS COM AS CALCULADAS COM BASE NO DOCUMENTO *FIB MODEL CODE FOR CONCRETE STRUCTURES (2010)*

Efetuada as medições experimentais, realizou-se uma comparação com resultados de extensões previstas por referências normativas. Como termo de comparação utilizou-se o documento *fib Model Code for Concrete Structures (2010)*. Neste modelo, para o cálculo de extensões totais, contribuem parcelas associadas à retração autogénea e a retração por secagem. As equações envolvidas no cálculo têm em conta também as seguintes condições:

- Idade do betão no momento em que se dá a exposição;
- Tipo de cimento utilizado;
- Humidade relativa e temperatura do meio de exposição;
- Geometria do provete (área da secção transversal e perímetro exposto);
- Resistência à compressão do betão.

Neste último parâmetro, no que diz respeito à resistência à compressão em cilindros aos 28 dias, f_{cm} , efetuou-se a média dos resultados obtidos em cubos, sendo que esta foi sujeita a um fator multiplicativo no valor de 0,85 para se proceder, por simplificação, a uma correspondência ao valor esperado para cilindros.

A evolução de deformações totais previstas por este modelo é apresentada no Gráfico 30.

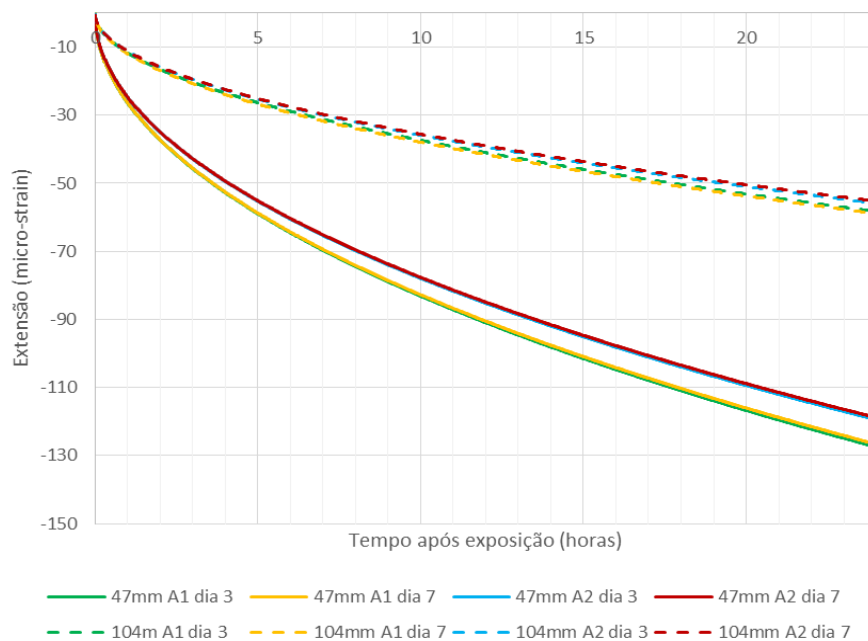


Gráfico 30 - Extensões calculadas com base no *fib Model Code for Concrete Structures (2010)*.

Da análise do Gráfico 30 e confrontando-o com os valores referentes aos resultados experimentais (linhas a traço contínuo nos Gráficos 19 a 26) nota-se a semelhança em algumas conclusões retiradas, nomeadamente: provetes de menor diâmetro apresentam deformações superiores e o aumento da temperatura induz um acréscimo na deformação longitudinal. No que se refere ao atraso na desmoldagem, a norma prevê uma pequena diminuição nas deformações, no entanto, esta alteração é praticamente impercetível nos casos analisados.

Além do comportamento evolutivo, é também importante salientar a ordem de grandeza das extensões previstas e compará-las com as obtidas experimentalmente. Em todos os resultados experimentais, a diferença entre os valores obtidos para os diferentes cenários é bastante superior à verificada na norma. Para provetes de 104 mm de diâmetro, pela análise proposta pelo modelo *fib*, a deformação estimada às 24h, para todas as combinações de idade e ambiente de exposição, varia entre 50 $\mu\epsilon$ a 60 $\mu\epsilon$ enquanto os valores obtidos no programa experimental variaram entre 24 $\mu\epsilon$ e 65 $\mu\epsilon$ (para deformações totais). Já nos provetes de 47 mm de diâmetro, os resultados às 24h esperados pelo modelo, apontam para cerca de 127 $\mu\epsilon$ para o ambiente 1 e 119 $\mu\epsilon$ para o ambiente 2. Estes valores sofrem um forte desvio relativamente às extensões apresentadas no Gráfico 27, que se aproximam de 150 $\mu\epsilon$ no ambiente 1 e dia 3 e rondam os 82 $\mu\epsilon$ para os restantes provetes deste diâmetro.

5

ANÁLISES TÉRMICAS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

5.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo pretende-se proceder à aplicação de conceitos referidos ao longo desta dissertação, efetuando simulações computacionais.

Como supracitado, as simulações numéricas têm como ferramenta o software DIANA. O DIANA (*DI*splacement *AN*alyzer) é um software baseado no método dos elementos finitos, multifuncional, vocacionado principalmente para aplicações nas áreas da engenharia de estruturas, engenharia geotécnica, e para a análise do comportamento de materiais estruturais. Na presente dissertação recorreu-se ao software DIANA para a realização de análises térmicas, para cálculo da evolução de temperaturas no betão sob efeito do fluxo de calor na superfície resultante da evaporação de água. Previamente, as propriedades térmicas do material betão e o coeficiente de convexão foram validados recorrendo a temperaturas medidas em provetes de betão que são sujeitos a uma transição rápida de ambiente (provetes previamente mantidos a uma temperatura de 35°C são transferidos de forma rápida para uma câmara à temperatura de 20°C).

5.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO ELEMENTO EM ANÁLISE

A simulação incidiu sobre dois dos provetes estudados ao longo do programa experimental. Optou-se então por estudar dois cilindros com 250 mm de altura e diferentes diâmetros. Um dos cilindros corresponde ao diâmetro intermédio utilizado nas análises experimentais, 104 mm, enquanto o outro corresponde ao diâmetro superior, 151 mm.

Tratando-se a peça em estudo de um elemento axi-simétrico, utilizou-se um modelo de elementos finitos axi-simétricos. A malha de elementos finitos (Figura 21) é assim uma superfície retangular. A Figura 20 representa as características geométricas do elemento em estudo.

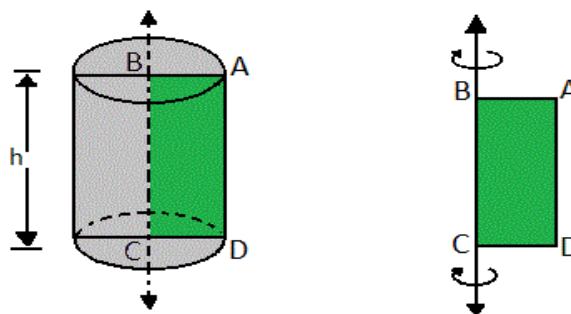


Figura 20 - Geometria do elemento em análise.

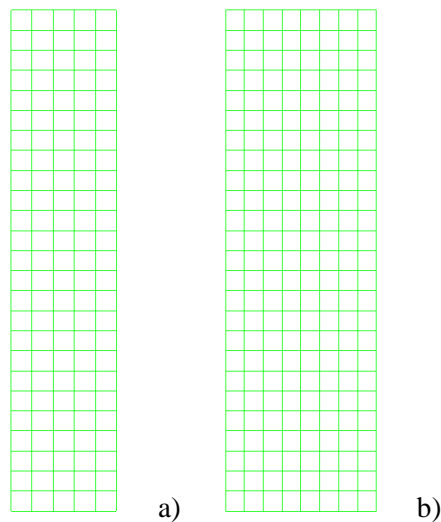


Figura 21 – Malha de elementos finitos. a) Provete de 104 mm de diâmetro; b) provete de 151 mm de diâmetro.

Para cada provete, efetuaram-se três análises distintas:

- Numa primeira fase, foi simulada uma alteração brusca de ambiente envolvente, para calcular a evolução de temperaturas no betão, e posterior comparação com resultados obtidos experimentalmente. Antes da mudança de ambiente o provete apresentava uma temperatura uniforme igual a 35°C. Sujeitou-se de forma brusca o elemento a uma temperatura exterior de aproximadamente 20°C. A alteração de ambiente deu-se em provetes com 6 dias de idade, desmoldados ao terceiro dia.
- Pretendeu-se também simular os efeitos da evaporação nos dois ambientes estudados. Deste modo, por um lado surge uma análise dos efeitos da desmoldagem a uma temperatura exterior constante de 35°C (ambiente 1). Por outro, é realizada uma análise análoga a uma temperatura exterior de 20°C (ambiente 2). Em cada uma dessas análises, são simulados os efeitos da evaporação, por imposição de um fluxo superficial de calor. A simulação do efeito da evaporação foi efetuada considerando uma desmoldagem dos provetes aos 3 e aos 7 dias de idade.

Repare-se que, no que respeita a análises térmicas, a linha B-C (ver Figura 20) corresponde a uma fronteira isolada, uma vez que coincide com o eixo de revolução da peça. Nessa fronteira não existem fluxos de calor.

Para a modelação dos provetes de betão, foram utilizados elementos finitos quadrangulares de 8 nós, designados por CQ8AHT no software DIANA (Figura 22). Foram utilizados elementos de fronteira de 3 nós, designados por BC3AHT.

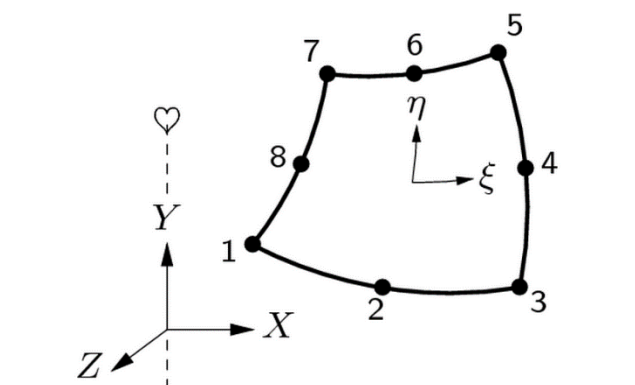


Figura 22 - Elemento finito de 8 nós (Diana FEA Manual, 2016).

Na análise dos resultados, houve principal enfoque em dois nós específicos da malha de elementos finitos de cada peça, concretamente, nos nós correspondentes à localização mais próxima dos sensores de temperatura instalados no provete em análise.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO BETÃO E ENVOLVÊNCIA

Para uma análise do tipo *Heat flow axi-symmetric* (fluxo de calor axi-simétrico), é necessária a definição de parâmetros que caracterizam o comportamento térmico do betão e das fronteiras.

Em primeiro lugar, foram estimados a condutividade térmica e o calor específico de acordo com as Equações (2.3) e (2.5), apresentadas no Capítulo 2, e com base nos valores tabelados para as correspondentes características dos materiais envolvidos na composição do betão (Quadros 2 e 3, Breugel, 1980).

Desta análise, resultou um valor de condutividade térmica do betão, k , de $2,589 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para um ambiente de $21,1^\circ\text{C}$ e de $2,494 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para um ambiente de $32,2^\circ\text{C}$ (ambientes caracterizados nas referências bibliográficas com temperaturas mais próximas das usadas no programa experimental).

O calor específico, dado em função do grau de hidratação, apresenta os valores indicados no Gráfico 31.

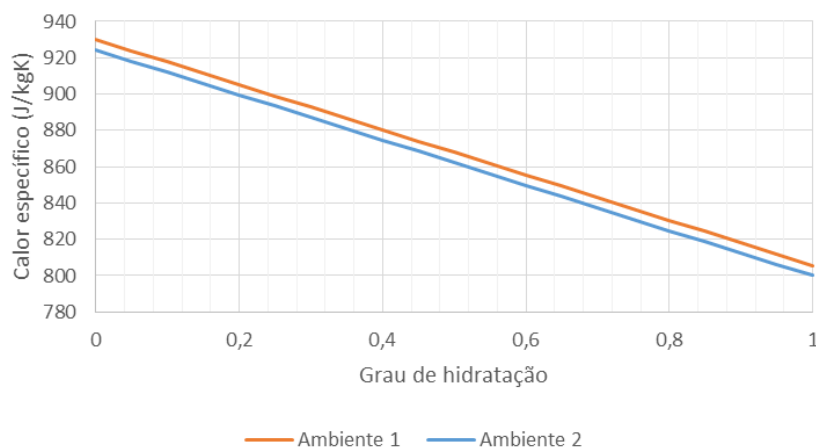


Gráfico 31 - Calor específico em função do grau de hidratação para os dois ambientes simulados.

Como referido no Capítulo 2, de acordo com a Equação (2.5), proposta por Breugel (1980), Lura (2001) e Ruiz *et al.* (2003), o calor específico varia com o grau de hidratação de modo linear. O intervalo de valores obtidos através das características individuais de cada componente do betão utilizado enquadra-se nos intervalos sugeridos pelos autores Breugel, Neville e Silveira. O declive negativo justifica-se pelo facto de o calor específico da água ser muito superior ao das restantes componentes ($4187 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ comparados com valores na ordem das 5 a 7 centenas). Desta forma, o aumento do grau de hidratação implica quantidades inferiores de água livre e, portanto, menor contributo desta parcela no calor específico do betão com maior maturidade. Comparando os dois ambientes, verifica-se que do ambiente 1 para o ambiente 2 dá-se uma variação do valor do calor específico em sentido descendente, uma vez que quanto mais elevada a temperatura, maior a dificuldade em torná-la ainda superior.

Para realizar uma análise térmica no DIANA é necessário especificar o valor do calor específico volumétrico. Para tal, é necessário seleccionar um valor de calor específico para cada ambiente e multiplicá-lo pela massa volúmica do material. Tratando-se o grau de hidratação de um parâmetro dificilmente estimável ao longo do tempo, adotaram-se valores de c correspondentes ao betão endurecido. Apesar de o grau de hidratação nunca atingir realmente o valor de 1, por simplificação, assumiu-se um calor específico para $\alpha=1$, que corresponde a valores de c na ordem dos $800 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Para uma massa volúmica do betão de aproximadamente 2300 Kg/m^3 , obtêm-se os valores de calor específico volumétrico de aproximadamente $1.840.000 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$.

O coeficiente de convecção é variável de acordo com diversos fatores, como por exemplo, a geometria do elemento, rugosidade da superfície, tipo de movimento e tipo de fluido, etc. Este valor pode variar ao longo do espaço, no entanto, é comum utilizar-se um coeficiente médio para uma dada superfície (Azenha, 2004). Neste caso, iniciou-se a análise com um coeficiente de convecção de $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, uma vez que este foi o valor obtido por calibração para elementos de betão em ambiente análogo ao ambiente 2 da presente dissertação.

Tendo por base os valores atrás apresentados, foi realizada uma análise de sensibilidade comparando as temperaturas calculadas com as temperaturas medidas nos provetes sujeitas à transição brusca de ambiente. O objetivo principal desta análise de sensibilidade é a calibração dos valores adotados para a condutividade térmica, o calor específico volumétrico e o coeficiente de convecção. Após esta análise, cujos resultados são sintetizados na secção 5.4, resultou a combinação de parâmetros indicada no Quadro 8.

Quadro 8 - Parâmetros térmicos obtidos após calibração.

Propriedade	
Condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	2,6
Calor específico volumétrico ($\text{J/m}^3\text{K}$)	2.000.000
Coeficiente de convecção ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	9,1

5.4 ALTERAÇÃO BRUSCA DE AMBIENTE

Para interpretação deste fenómeno, foi induzida uma temperatura inicial uniforme no elemento de betão de 35°C e uma temperatura exterior de 20,35°C, correspondendo este último valor a uma média das temperaturas registadas no momento em que se dá o equilíbrio térmico com o ambiente.

Foram utilizados incrementos de tempo de acordo com a seguinte sequência, tal que, é representado o valor do intervalo (em segundos) e o número de vezes que este se repete (dentro de parênteses): 5(12) 10(6) 30(16) 60(50) 300(132).

Os Gráficos 32 a 35 apresentam os valores calculados (a tracejado) e os resultados medidos para os correspondentes provetes.

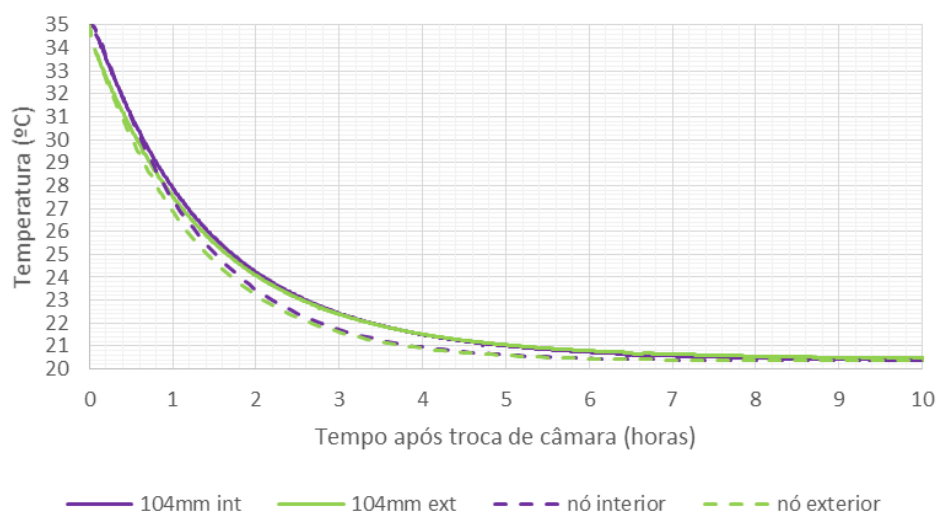


Gráfico 32 - Resultados experimentais vs simulações numéricas para uma alteração brusca de ambiente no provete de 104 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas anteriores à calibração ($k = 2,54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 1840000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

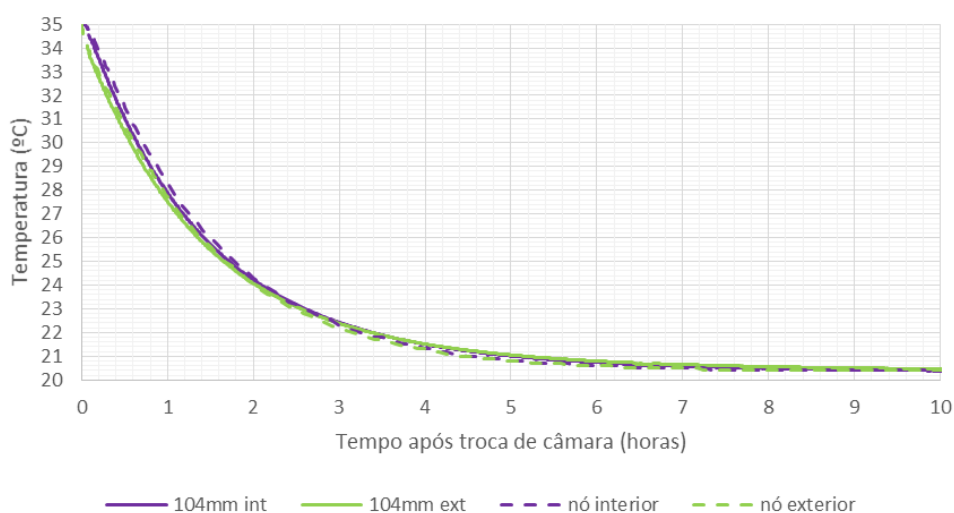


Gráfico 33 - Resultados experimentais vs simulações numéricas para uma alteração brusca de ambiente no provete de 104 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas definidas no Quadro 8 ($k = 2,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 2000000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 9,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

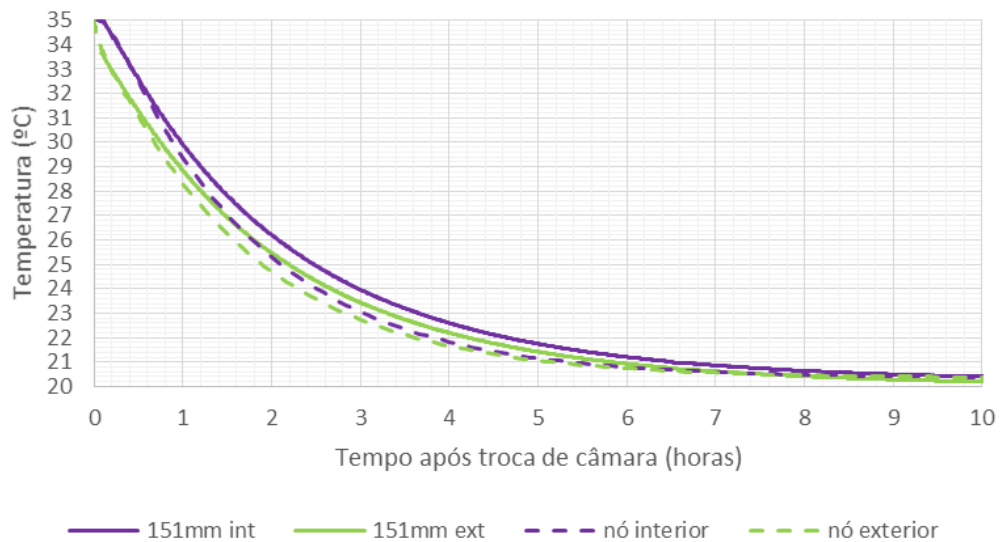


Gráfico 34 - Resultados experimentais vs simulações numéricas para uma alteração brusca de ambiente no provete de 151 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas anteriores à calibração ($k = 2,54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 1840000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

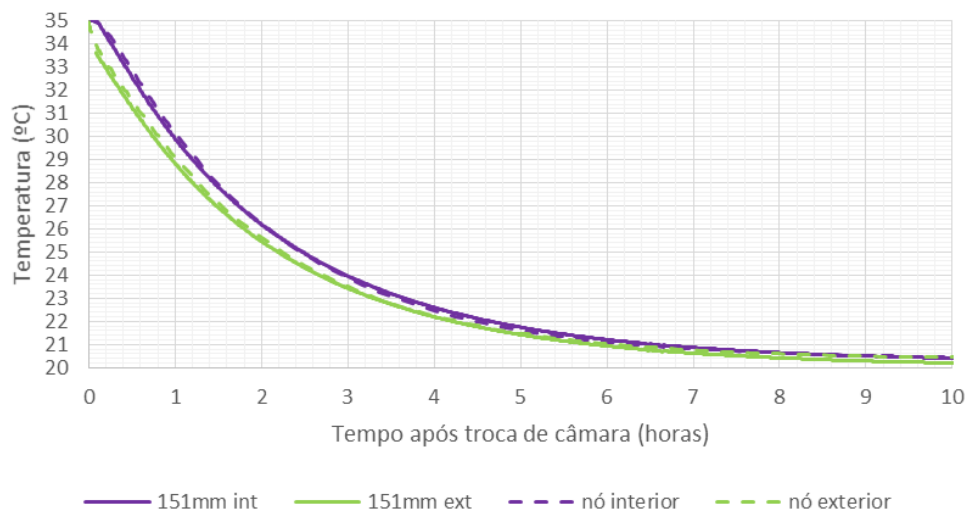


Gráfico 35 - Resultados experimentais vs simulações numéricas para uma alteração brusca de ambiente no provete de 151 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas definidas no Quadro 8 ($k = 2,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 2000000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 9,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

Repare-se que na troca de câmara climática, apesar de o procedimento ter sido efetuado com todas as precauções e maior rapidez possível, foram perdidos 5 minutos de leituras após os provetes serem retirados do ambiente a 35°C e se dar início às medições de temperatura no novo ambiente. Deste modo, foi necessário ter em conta este intervalo de tempo sem medições, efetuando uma translação do gráfico de valores experimentais para uma correta comparação entre ambos.

Apresentam-se em seguida os campos de temperaturas para diferentes instantes de tempo (Figuras 23 e 24). As diferentes cores apresentadas nas imagens correspondem a diferentes intervalos de temperatura.

De imagem para imagem repara-se que a escala cromática de temperaturas é alterada, uma vez que as diferenças de temperatura no interior do provete são muito reduzidas, sendo necessário utilizar escalas diferentes para cada instante de tempo.

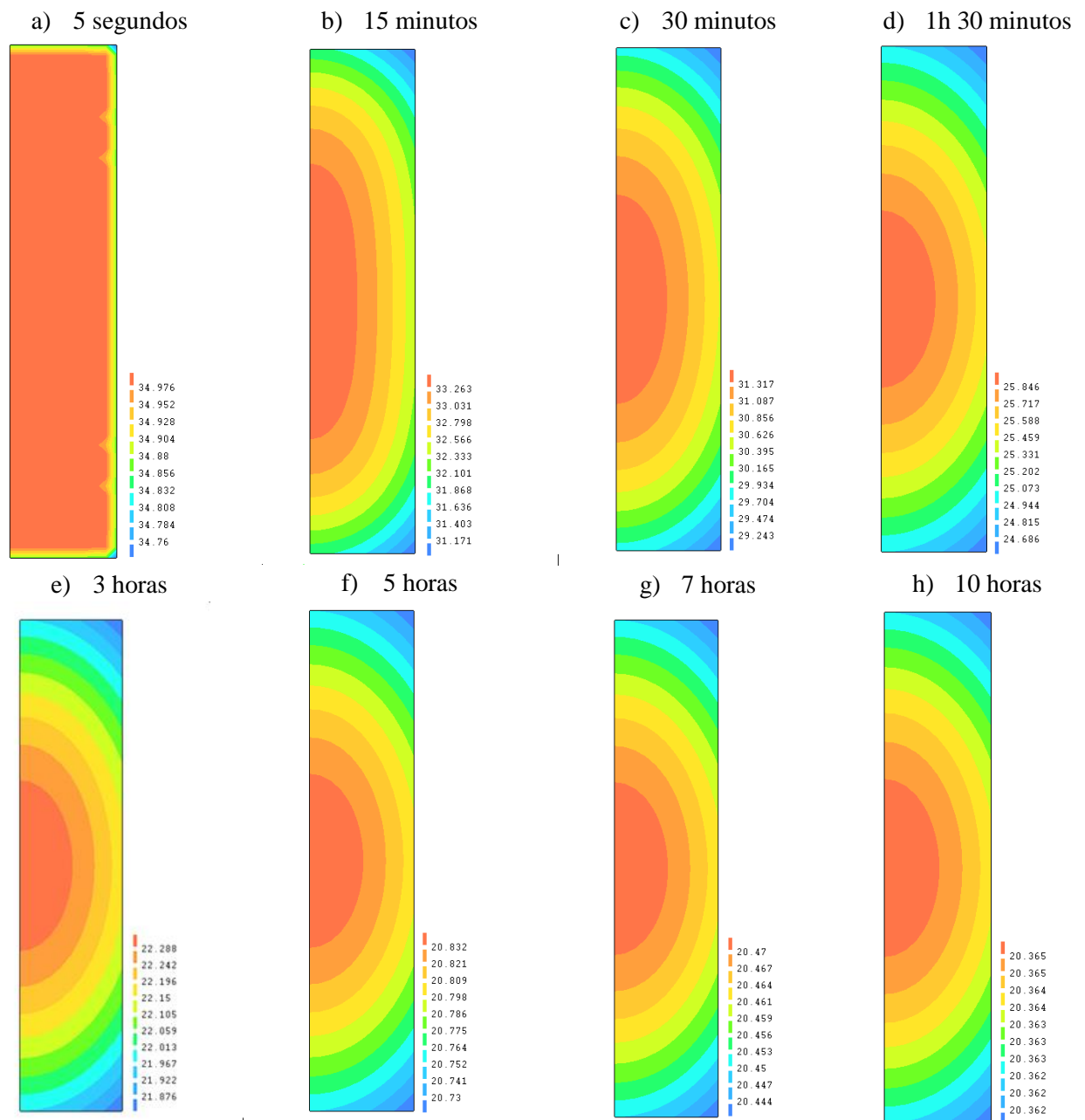


Figura 23 - Evolução do campo de temperaturas no provete de 104 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas definidas no Quadro 8 ($k = 2,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 2000000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 9,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

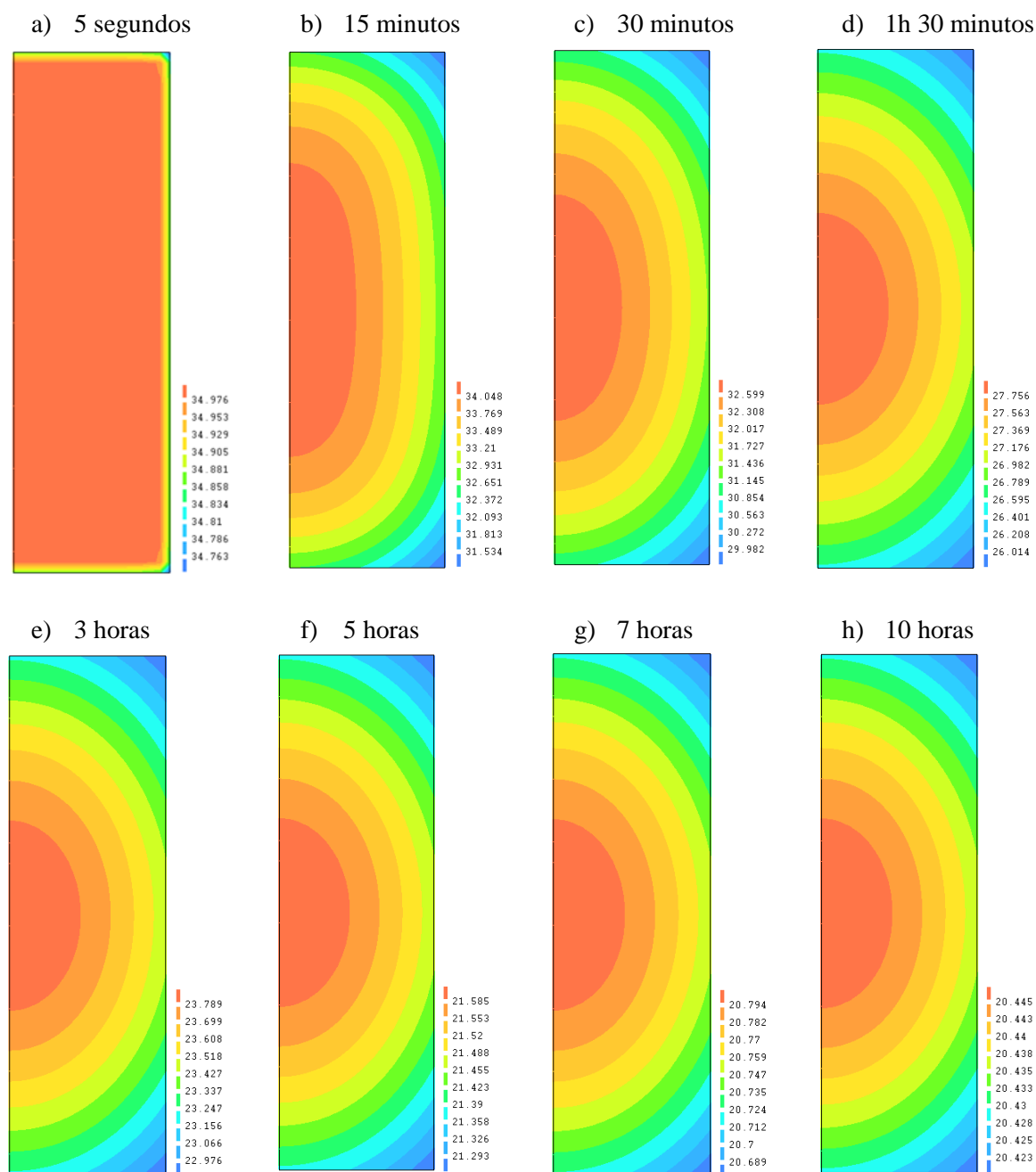


Figura 24 - Evolução do campo de temperaturas no provete de 151 mm de diâmetro, utilizando as propriedades térmicas definidas no Quadro 8 ($k = 2,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho c = 2000000 \text{ J/m}^3\text{K}$ e $hc = 9,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

Da análise dos Gráficos 32 a 35 e Figuras 23 e 24 é possível retirar as seguintes conclusões:

- O provete de menor diâmetro adapta-se mais rapidamente às alterações bruscas de ambiente. No provete de 104 mm o equilíbrio térmico com o meio envolvente é atingido aproximadamente às 8 horas enquanto no provete de 151 mm de diâmetro este é alcançado apenas entre as 9 e 10 horas após a troca de ambiente exterior. Para o provete de menores dimensões, além da estabilização de temperatura ser mais rápida, a sua variação é mais acentuada nas primeiras horas.
- Nas imagens dos campos de temperatura é possível observar que o arrefecimento, proveniente do exterior, afeta inicialmente a superfície do provete, sendo que o arrefecimento do núcleo se dá de um modo bastante mais lento, conforme era expectável.
- Em todos os instantes de tempo, a temperatura no núcleo é superior à temperatura na superfície. Porém, esta diferença vai-se reduzindo significativamente ao longo do tempo, o que resulta progressivamente numa amplitude de temperaturas decrescente.
- Por último, verifica-se que, considerando os parâmetros calibrados, a análise conduz a um excelente ajuste aos valores medidos.

5.5 PROVETE SUJEITO A EVAPORAÇÃO A PARTIR DA SUPERFÍCIE

Selecionados os parâmetros térmicos do material (condutividade térmica e calor específico apontados no Quadro 8) é necessário definir as condições de evaporação de cada ambiente. Esta etapa tem por base os resultados analisados no subcapítulo 4.2. Relativamente ao coeficiente de convecção utilizado, note-se que o selecionado na análise anterior refere-se ao que melhor se adaptou, nas condições específicas do subcapítulo precedente. Para as restantes análises, não havendo precisão sobre este valor, efetuou-se uma simulação para dois coeficientes diferentes, $7,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Foi considerado este intervalo de valores plausíveis para avaliar a influência do coeficiente h sobre a evolução de T . Isto é justificável principalmente no caso do ambiente 1, porque a calibração em 5.4 foi feita para o ambiente 2.

Para simular o efeito da evaporação na análise com elementos finitos, é necessário inserir um fluxo de calor em todos os elementos finitos de fronteira em contacto com o exterior (todas as fronteiras exceto a zona delimitada pelo eixo de revolução). Nas análises, assume-se um fluxo constante ao longo de toda a superfície exterior do provete, o que constitui uma simplificação da realidade. Considerou-se uma evolução do fluxo de calor ao longo do tempo igual à caracterizada experimentalmente com base na medição das variações de massa (valores apresentados no subcapítulo 4.2).

O fluxo inicial (isto é, no instante de tempo $t = 0$, correspondente ao instante de desmoldagem) corresponde ao máximo fluxo detetado experimentalmente: -161 W/m^2 para o ambiente 1, -58 W/m^2 para o ambiente 2 e exposição ao terceiro dia e -42 W/m^2 para o ambiente 2 e exposição ao sétimo dia. A evolução desse fluxo ao longo do tempo, caracterizada experimentalmente, é representada no Gráfico 10.

Foram utilizados incrementos de tempo de acordo com a seguinte sequência, tal que, é representado o valor do intervalo (em segundos) e o número de vezes que este se repete (dentro de parênteses): 5(12) 10(6) 30(16) 60(200) 300(264).

Os gráficos 36 a 42 representam as evoluções de temperatura resultantes da simulação numérica. Os valores calculados (a tracejado) são apresentados em paralelo com os resultados obtidos ao longo do programa experimental.

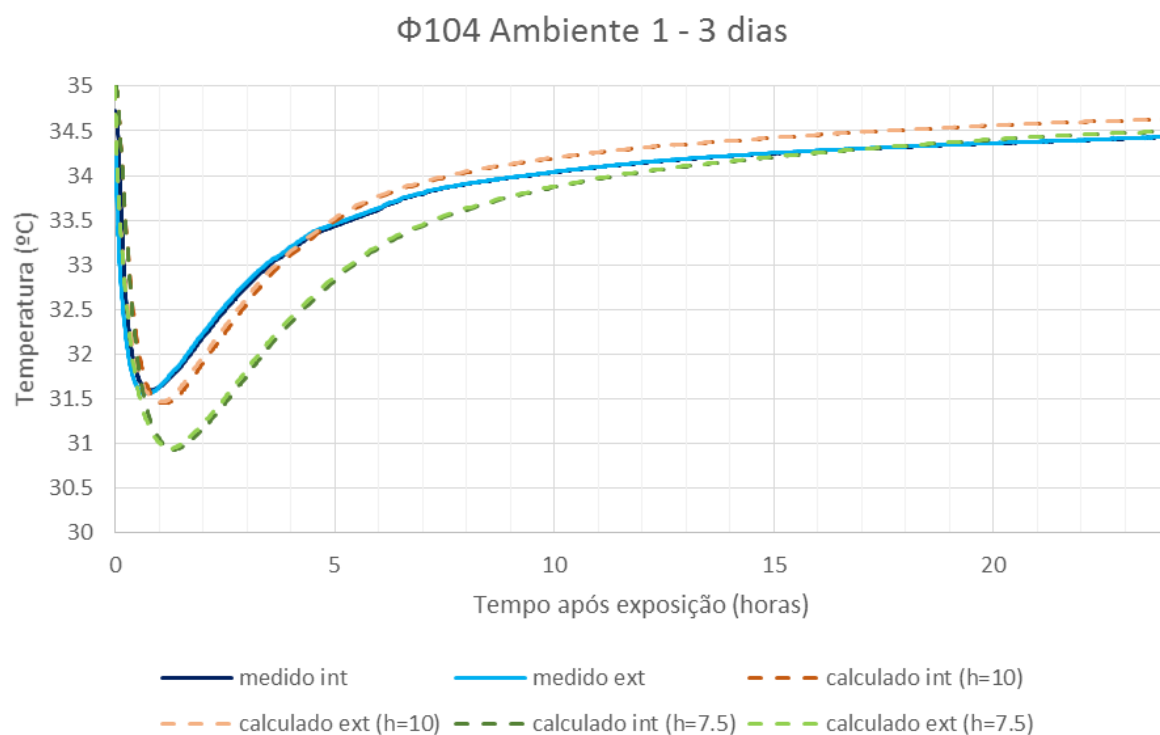


Gráfico 36 – Valores calculados vs valores medidos para o provete de 104 mm de diâmetro, exposto no ambiente 1 ao terceiro dia de idade.

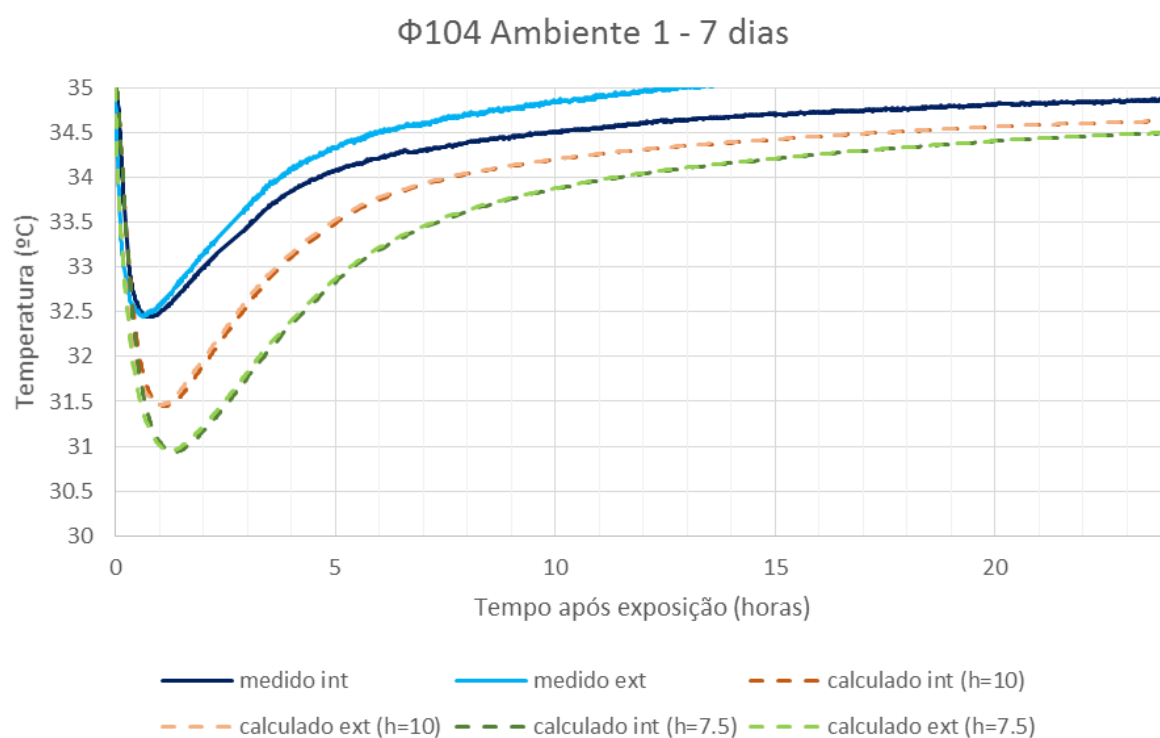


Gráfico 37 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 104 mm de diâmetro, exposto no ambiente 1 ao sétimo dia de idade.

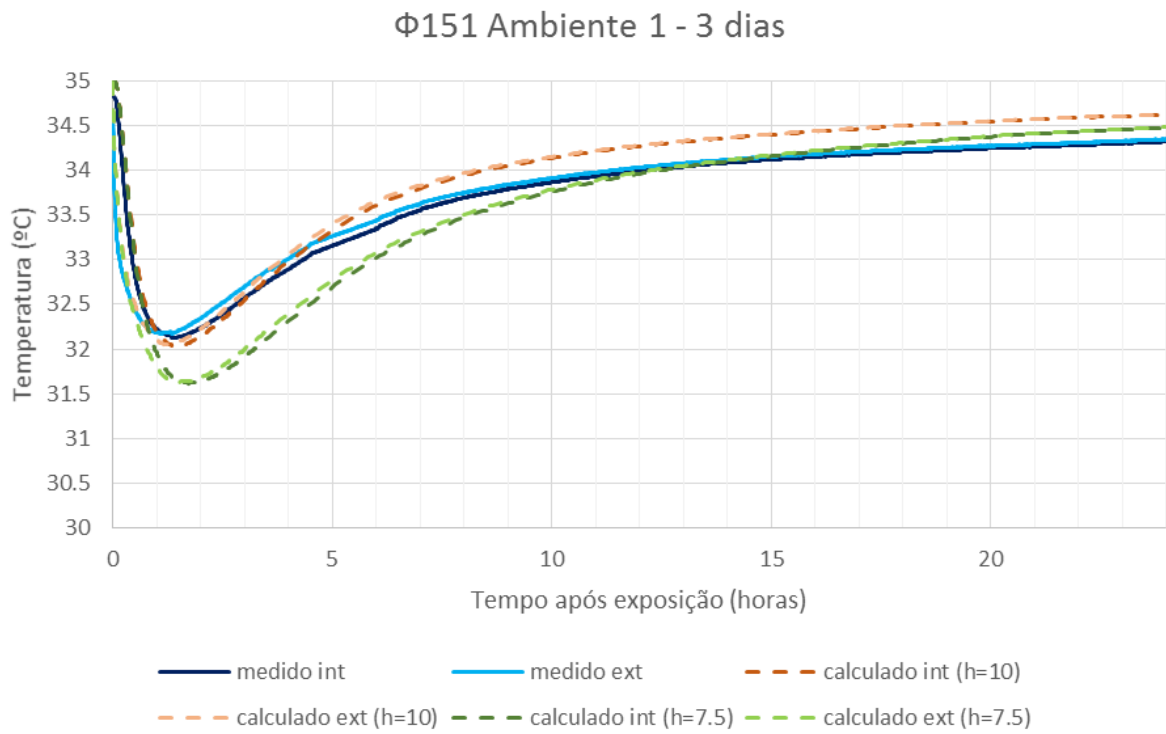


Gráfico 38 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 151 mm de diâmetro, exposto no ambiente 1 ao terceiro dia de idade.

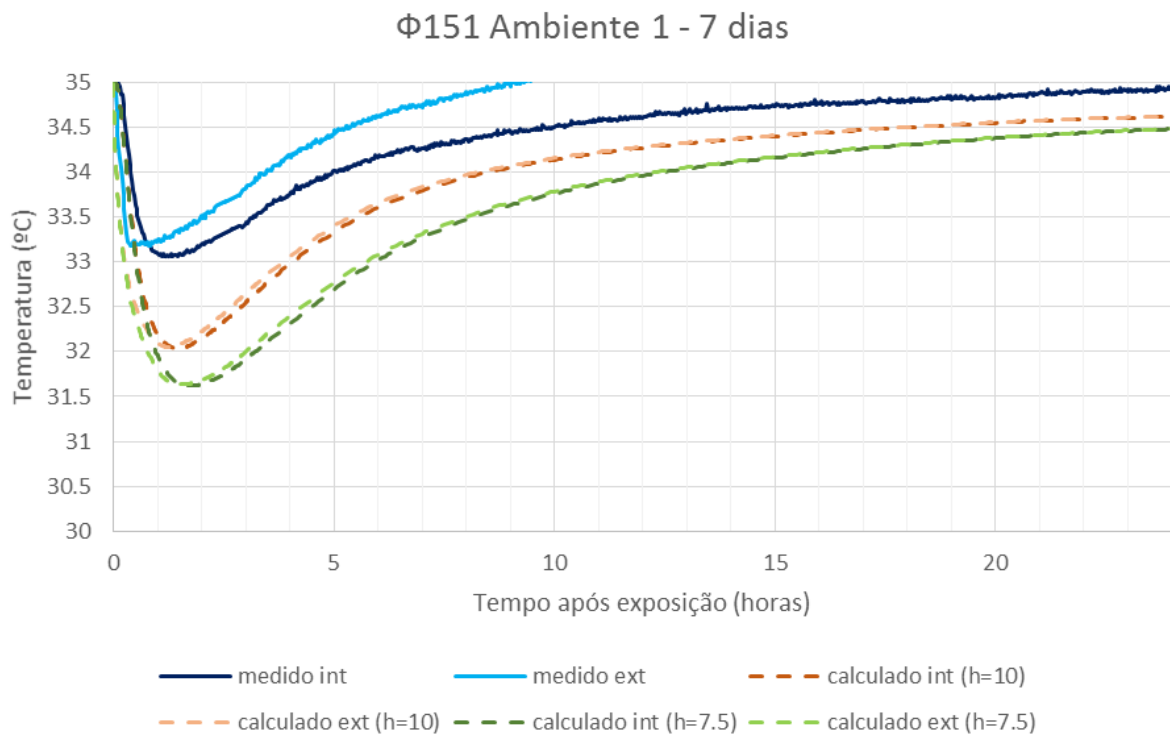


Gráfico 39 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 151 mm de diâmetro, exposto no ambiente 1 ao sétimo dia de idade.

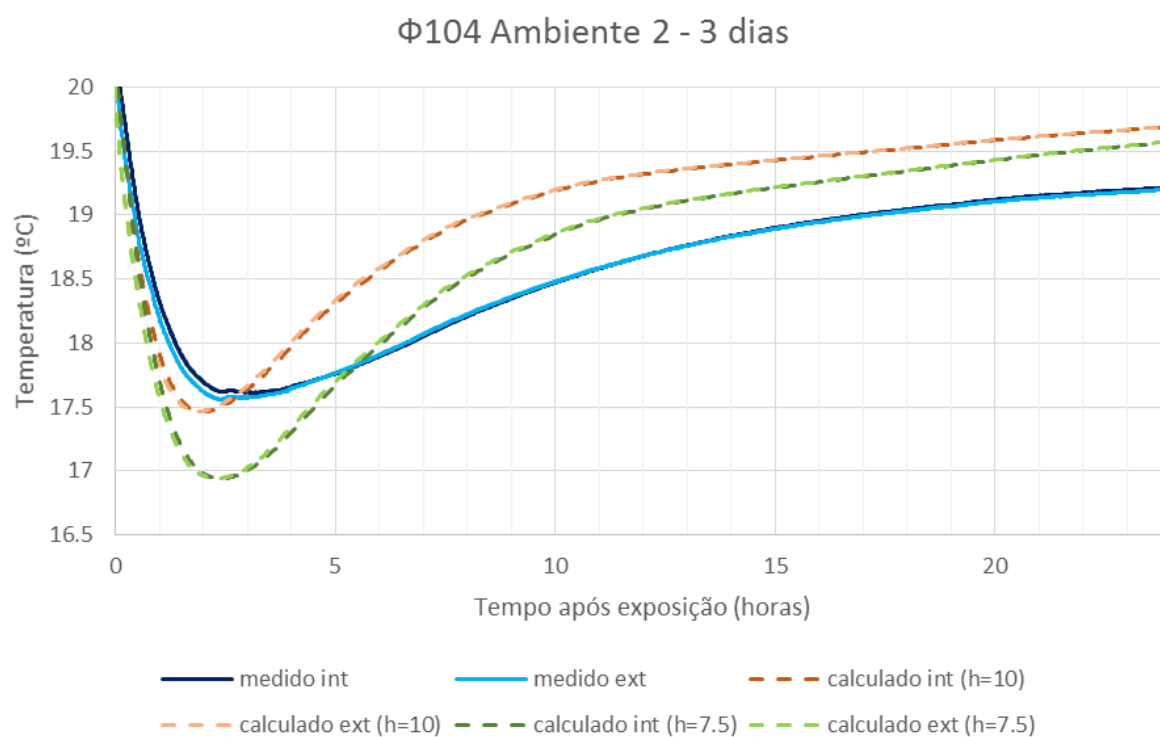


Gráfico 40 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 104 mm de diâmetro, exposto no ambiente 2 ao terceiro dia de idade.

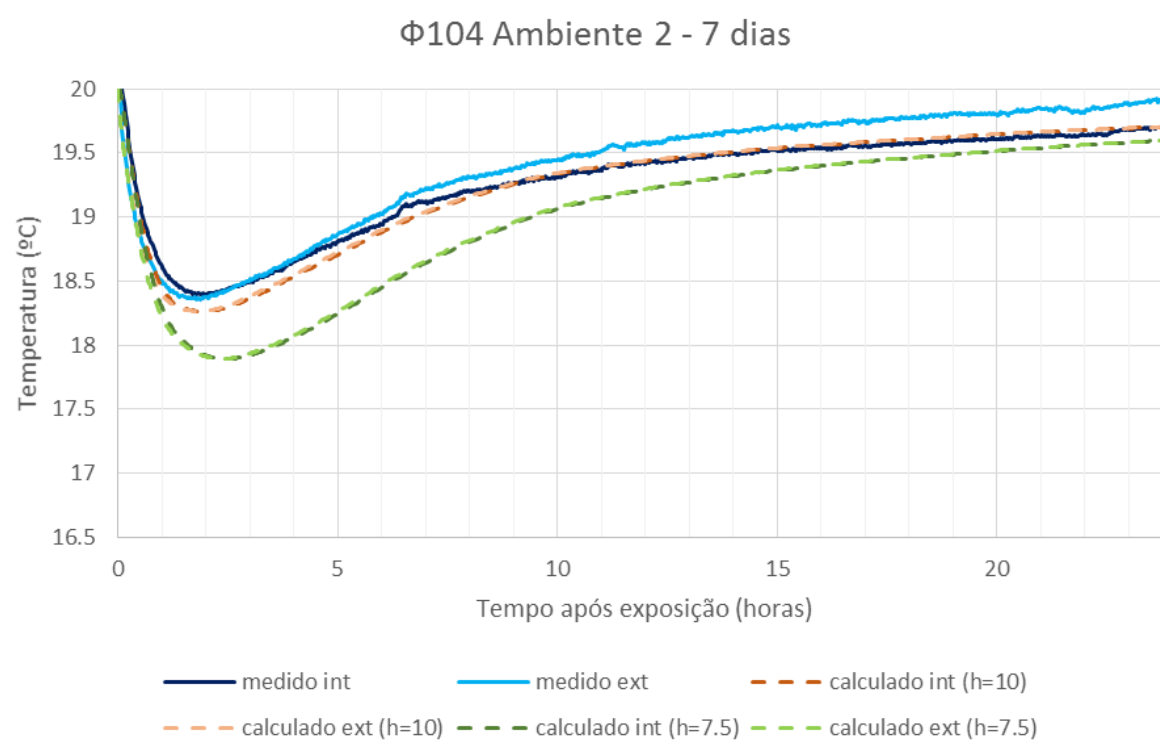


Gráfico 41 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 104 mm de diâmetro, exposto no ambiente 2 ao sétimo dia de idade.

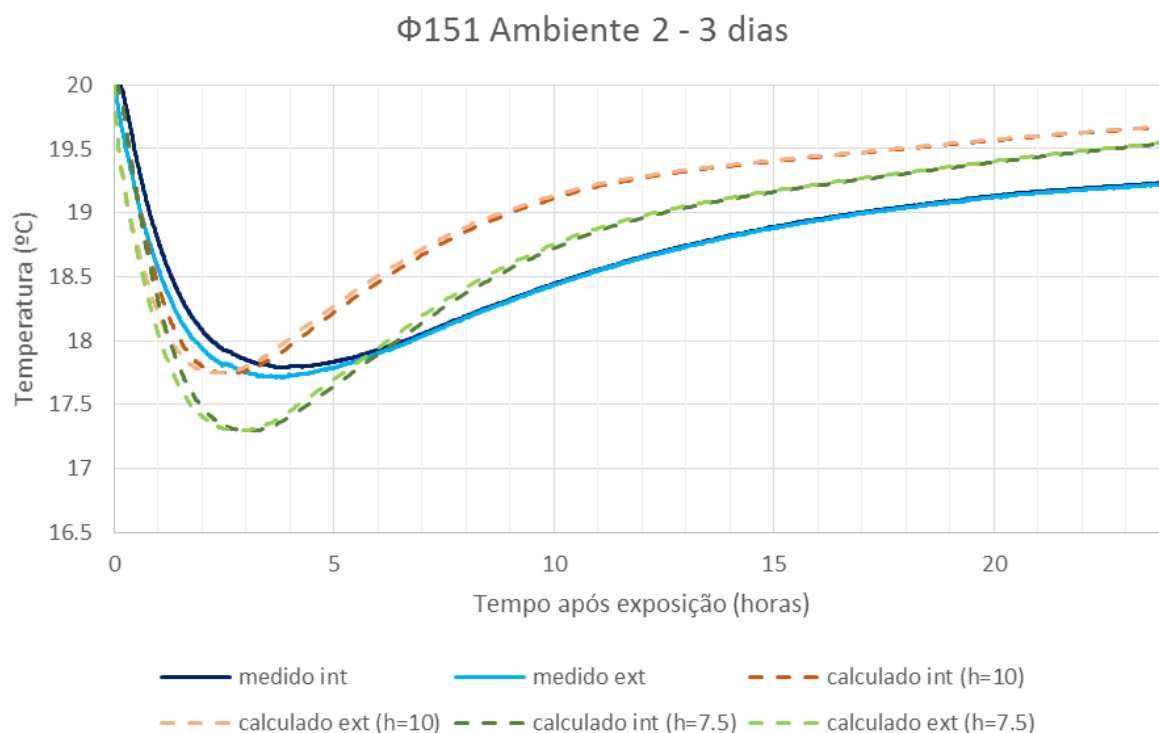


Gráfico 42 - Valores calculados vs valores medidos para o provete de 151 mm de diâmetro, exposto no ambiente 2 ao terceiro dia de idade.

A evolução de temperatura num provete de 151 mm de diâmetro, no ambiente 2, para desmoldagem aos 7 dias não foi medida, daí a sua não apresentação gráfica.

Da análise dos gráficos 36 a 42, em alguns casos, repara-se uma diferença considerável entre os resultados afetos às medições e valores calculados. No ambiente 1, parte desta diferença pode ser justificada pelo facto de nas medições de massa ter existido algum movimento de ar, que foi eliminado posteriormente, nas medições de temperatura, por introdução de uma barreira. As ligeiras correntes de ar existentes nas medições de massa induzem os valores de fluxo em erro, o que implica uma sobre-estimativa da descida de temperatura. Além deste inconveniente, considera-se ainda que todo o procedimento experimental possa ter implícito obstáculos de vários tipos que tenham tido influência nos resultados tais como: provetes betonados em dias diferentes; posição do provete na câmara; incerteza nas medições de temperatura e incerteza nas medições de massa. Destaca-se, no entanto, um muito bom ajuste entre valores calculados e medidos aos 3 dias para um coeficiente de convecção de $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Relativamente a estes resultados, note-se que há grande confiança nas medições efetuadas aos 3 dias (sensores com encapsulamento de aço) e incertezas nos valores medidos aos 7 dias (PT100 com montagem manual).

6

NOTAS FINAIS

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação incidiu sobre a compreensão do fenómeno do arrefecimento por evaporação superficial em elementos de betão corrente. Tratando-se de uma etapa ultrapassada pela grande maioria das obras de engenharia civil (momentos posteriores à remoção da cofragem e final da cura), considera-se fundamental o aprofundamento no conhecimento do fenómeno. Estudos previamente realizados sobre este tema, tais como o artigo *Shock of Evaporative Cooling of Concrete in Hot Dry Climates* (Kovler, 1995) e o relatório “Arrefecimento por evaporação em materiais cimentícios: Estudos experimentais paramétricos” (Azenha *et al.*, 2013) foram uma forte influência sendo que foram tomados como ponto de partida e inspiração para o desenvolvimento do presente documento, essencialmente no que diz respeito à base do programa experimental. De um modo geral, considera-se que os resultados obtidos ao longo do estudo funcionam como complemento às referências bibliográficas supracitadas, entre outras, para melhoria do conhecimento do comportamento do betão quando sujeito a uma repentina exposição ao ar.

Numa primeira fase, com base na pesquisa bibliográfica realizada, foram descritos alguns conceitos e fenómenos de origem térmica associados ao betão e às suas condições de fronteira. Posto isto, iniciou-se o programa experimental. Esta etapa consistiu no principal objetivo da dissertação: a caracterização experimental das alterações que ocorrem nas primeiras horas após a desmoldagem (efeitos da evaporação superficial).

O programa englobou diferentes cenários no que respeita a dimensões de provetes, idade de desmoldagem e ambiente de exposição. Nas avaliações das variações de massa, temperaturas e deformações livres longitudinais, consideraram-se fundamentais as seguintes conclusões:

- Efetuando-se uma análise por ambiente foi possível aferir que, de um modo geral o aumento da temperatura agrava os efeitos da evaporação. Relativamente ao campo de humidades, o programa não permitiu uma concreta análise da sua influência uma vez que os ambientes com possibilidade de serem simulados assumiram humidades relativas muito próximas. No ambiente mais quente ocorreram perdas de massa mais rápidas e acentuadas, decréscimos de temperatura superiores em intervalos de tempo mais curtos e deformações mais elevadas para um semelhante intervalo temporal. Conforme era expectável, verificou-se que o aumento da temperatura desencadeia ambientes com maior potencial de evaporação e agravamento das suas consequências.
- No que respeita a dimensões de provetes, concluiu-se que espessuras equivalentes inferiores associam-se a mais rápidas perdas de massa e valores mais acentuados de diminuição de

temperatura e deformação longitudinal. Tendo em conta que o meio de arrefecimento e secagem provém do exterior, quanto maior o diâmetro do elemento, maior a dificuldade de acesso a poros interiores e maior a inércia térmica do núcleo da peça, logo, a perda de água e alterações do campo de temperaturas serão mais lentas.

- É ainda importante referir que velocidade de resposta do betão às alterações de temperatura diminui à medida que nos afastamos da superfície do elemento. Esta constatação foi comprovada analisando os resultados provenientes dos sensores de temperatura inseridos no núcleo ou à superfície da peça, sendo que os últimos registaram, de um modo geral, valores mais próximos da temperatura exterior.
- Outro tipo de análise consistiu na alteração da idade de desmoldagem e consequente exposição. As características de uma peça de betão diferem com a sua maturidade. Assim, realizaram-se ensaios com desmoldagens efetuadas ao terceiro e sétimo dia após a moldagem. Daqui concluiu-se que o efeito da evaporação diminui com o atraso da exposição. Ao longo do tempo a rede porosa do betão altera-se, tornando-se mais consistente e fechada, o que atenua os efeitos da evaporação.

Efetuada o procedimento experimental, partiu-se para uma análise numérica utilizando o software DIANA como ferramenta. A partir de referências bibliográficas, foram utilizadas fórmulas e valores tabelados para estimar os principais parâmetros de origem térmica a considerar nas análises: a condutividade térmica, calor específico, coeficiente de convecção e evolução de fluxos de calor. Definida a geometria da peça (representada através de elementos finitos axi-simétricos), definidas as condições de fronteira e parâmetros acima citados, característicos do betão em estudo, efetuaram-se dois tipos de análise diferentes. Por um lado, analisou-se uma peça de betão com temperatura constante sujeita a uma alteração súbita de ambiente, de modo a prever o seu comportamento e evolução do campo de temperaturas em consequência da adaptação às novas condições. Por outro lado, simularam-se duas situações de evaporação (temperaturas inicialmente constantes e exposição abrupta) para os diferentes ambientes em estudo no presente documento.

Das análises numéricas efetuadas para a situação de mudança brusca de ambiente foi possível obter uma boa correlação entre valores medidos e valores calculados, originando ainda previsões comportamentais mais completas do campo de temperaturas que surge no elemento perante as condições já expostas. No entanto, para o segundo tipo de análise (provetes sujeitos a evaporação a partir da superfície), em alguns casos, os resultados afastaram-se do previsto. Como justificações possíveis para os pequenos desvios notados, consideraram-se algumas incertezas: provetes betonados em dias diferentes; posição do provete na câmara; medições de temperatura; medições de massa e essencialmente, incerteza nos valores de fluxo utilizados. Contudo, seria necessário investigar e aprofundar as causas prováveis deste afastamento. Em outros casos, nota-se um excelente ajuste entre valores medidos e calculados, nomeadamente para medições aos 3 dias e para um coeficiente de convecção superior.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Concluído o presente estudo, considera-se que existem ainda aspetos, não desenvolvidos na dissertação, que poderão ser futuramente aprofundados. Deste modo, para dar continuidade ao trabalho desenvolvido, sugerem-se os seguintes trabalhos complementares:

- Realização de análises termo-mecânicas, para determinação da evolução ao longo do tempo (nas primeiras horas após a desmoldagem) das tensões instaladas à superfície de elementos de betão em resultado do efeito de evaporação superficial, para avaliação do risco de fissuração. Como cenário mais desfavorável em termos de risco de fissuração, podem ser considerados elementos com reduzida espessura equivalente totalmente restringidos.
- Realização de análises termo-higro-mecânicas para determinação da evolução temporal de tensões e do risco de fissuração considerando a combinação dos efeitos térmicos com os efeitos da retração por secagem.
- Desenvolvimento de estudos semelhantes aos da presente dissertação, considerando betões com composições diferentes (por exemplo, através da utilização de adições em substituição parcial do cimento), para avaliar a influência da composição sobre o efeito de arrefecimento por evaporação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Fadhala, M. and Hover, K. (2001). Rapid evaporation from freshly cast concrete and the Gulf environment. *Constr. Building Mat.*, 15 1-7.
- Azenha, M., 2004. "Comportamento do betão nas primeiras idades. Fenomenologia e análise termo-mecânica", Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Azenha, M., 2009. "Numerical simulation of the structural behaviour of concrete since its early ages", Tese de Doutoramento - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Azenha, M. et al., 2013. "Comportamento em serviço de estruturas de betão: uma abordagem multi-física das tensões auto-induzidas: Arrefecimento por evaporação em materiais cimentícios: Estudos experimentais paramétricos".
- Azenha, M. et al., 2017. "Experimental validation of a framework for hygro-mechanical simulation of self-induced stresses in concrete". *Cement and Concrete Composites*, Volume 80, pp. 41-54.
- Azenha M., Faria R, Ferreira D., "Identification of early-age concrete temperatures and strains: monitoring and numerical simulation". *Cem. Concr. Compos.* 31 (6) (2009) 369-378.
- Breugel, K. (1980), "Artificial cooling of hardening concrete." *Concrete Structures*, Delft University of Technology, Delft.
- Breugel, K. (1991), *Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials*, Doctoral Thesis, Delft.
- Breugel, K. (1998), "Prediction of temperature development in hardening concrete", *Prevention of thermal cracking in concrete at early ages*. Report 15, R. Springenschmid, E & FN SPON.
- Breugel, K. (2001), "Hydration of Cement-Based Systems. Aspects of hydration of cement-based systems and possibilities to quantify the evolution of hydration processes." *IPACS Document*, Subtask 2.1.
- Breugel, K. e Lura, P. (2001), "Deformational behaviour and self induced stresses in hardening concrete." *IPACS Document*, Subtask 3.2.
- Carvalho, R., 2017. "Rumo à análise 3D pelo método dos elementos finitos do efeito combinado de ações diretas e da retração impedida em lajes de betão armado", *Escola de Engenharia da Universidade do Minho*, Dissertação de Mestrado.
- De Schutter, G. (2001), "Thermal properties", *Early age cracking in cementitious systems*. Report 25, A. Bentur, RILEM Publications s.a.r.l.
- DIANA FEA Manual, 2016. "DIANA User's Manual". Release 10.1 ed. Delftechpark 19a, 2628 XJ Delft, The Netherlands.: DIANA FEA BV.
- fib, 2010. "Model Code for Concrete Structures 2010".
- Holt, E. (2001), "Early age autogenous shrinkage of concrete." *VTT Publications*, Technical Research Centre of Finland.
- JCI (1985). *Thermal stress in mass concrete*. Japanese Concrete Institute. State of the art report.
- Kovler, K. (1995). Shock of evaporative cooling of concrete in hot dry climates. *Concrete International*, 17(10).

- Lura, P. e Breugel, K. (2001), "Thermal Properties of Concrete: Sensitivity studies." IPACS Document, Subtask 2.5.
- Neville, A. (1995). Properties of Concrete, Prentice Hall, 844.
- NP EN 12350-2, 2009. "Ensaaios de betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento".
- NP EN 12390-7, 2009. "Ensaaios do betão endurecido - Parte 7: Massa volúmica".
- NP EN 12390-3, 2011. "Ensaaios do Betão Endurecido - Parte 3: Resistência à compressão".
- Parrott, L. J., Geiker, M., Gutteridge, W. A. and Killoh, D. (1990). Monitoring Portland cement hydration: Comparison of methods. Cement and Concrete Research, 20 (6): 919-926.
- Ruiz, J., Schindler, A., Rasmussen, R. e Johnson, T. (2003), "Prediction of heat transport in concrete made with blast furnace slag aggregate", 9th conference on Advances in Cement and Concrete, Colorado, USA.
- Schindler, A. (2002). Concrete hydration, temperature development, and setting at early-ages. PhD Thesis. University of Texas at Austin.
- Silveira, A. (1996), A influência das ações térmicas no comportamento de pontes de betão armado, Tese de Doutoramento, LNEC, Lisboa.
- Sousa, C., 2017. "Introdução às Técnicas de Medição para Observação de Estruturas de Engenharia Civil", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Young, Hugh D. University Physics, 7th Edition, Addison Wesley, 1992.